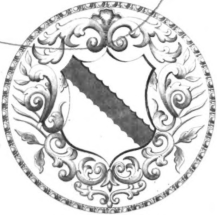
Digitized by Google

600044726T

G. 10. D. 19.



E. BIBL. RADCL.

D. Subt. 2

1988 e. 165/1

Digitized by Google

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE MÉTÉOROLOGIE

TYPOGRAPHIE DE CH. LAHURE
Imprimeur du Sénat et de la Cour de Cassation
rue de Vaugirard, 9

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE MÉTÉOROLOGIE

PAR

M. POUILLET
MEMBRE DE L'INSTITUT (ACADÉMIE DES SCIENCES)

OUVRAGE AUTORISÉ PAR LE CONSEIL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE

Septième édition

TEXTE
TOME PREMIER

PARIS
LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C[ie]
RUE PIERRE-SARRAZIN, N° 14
(Près de l'École de médecine)

1856

AVERTISSEMENT

SUR LA SEPTIÈME ÉDITION

DES ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE

ET DE MÉTÉOROLOGIE.

Dans le court espace de temps qui s'est écoulé, depuis que la sixième édition de cet Ouvrage a été soumise au public, les progrès de la science ont été marqués par de nombreux travaux et par d'importantes découvertes; on a vu de toutes parts, soit en France, soit à l'étranger, une foule de jeunes gens se livrer à des recherches intéressantes et associer ainsi leurs noms aux noms éminents des physiciens qui, dans ces dernières années, ont imprimé une si vive impulsion à toutes les branches de la physique. Tant de résultats nouveaux obtenus en si peu de temps, en France, en Angleterre, en Italie, en Allemagne, en Russie et en Amérique, sont la preuve la plus frappante que la science est pour ainsi dire à sa naissance, et que nous commençons à peine à posséder les vrais moyens d'observation qui doivent nous conduire un jour à enchaîner l'ensemble des phénomènes naturels par des lois générales et certaines.

Si les grandes divisions de la physique sont tracées de-

puis longtemps, si la pesanteur, la chaleur, l'électricité, le magnétisme, les actions moléculaires, l'acoustique et l'optique, constituent la physique moderne comme la physique ancienne, ce n'est pas une raison de penser que notre siècle est stationnaire ou que la physique est à son terme; on peut en conclure seulement que les forces auxquelles est soumise la matière sont en petit nombre, qu'elles se sont révélées aux anciens observateurs par des phénomènes plus ou moins apparents, et que dès l'origine il a été facile d'en faire la classification et le dénombrement général; on peut en conclure encore que le véritable but de la science n'est pas de chercher à découvrir des forces nouvelles, mais de déterminer les lois et les modes d'action des forces connues. Telle est en effet la direction qui est suivie depuis plus de trois siècles, sur les traces de Képler, de Galilée, de Descartes, de Pascal et de Newton, qui ont les premiers ouvert à l'esprit humain cette vaste carrière. Combien de grandes découvertes ont enrichi la science pendant ces trois siècles, les plus brillants de l'histoire du monde! et cependant combien nos connaissances paraissent restreintes et bornées lorsqu'on jette un coup d'œil profond sur les mystères sans nombre qui nous environnent de toutes parts! A mesure que la science marche, notre esprit semble s'élever sur un plus vaste horizon, d'où il aperçoit des régions nouvelles de plus en plus étendues, qui restent à explorer. Nous commençons à sortir des ténèbres, notre vue s'affermit à la lumière, et nous pouvons mieux juger qu'à aucune autre époque des secours solides et puissants que la science peut prêter à la civilisation. Les théories se développent, les applications se multiplient, les entreprises industrielles y puisent des ressources jusqu'alors inconnues : après avoir pris son rang dans l'enseignement général pour habituer

l'intelligence à la logique des faits, qui est à la fois si féconde et si lumineuse, la physique pénètre dans les ateliers pour y porter le goût de l'exactitude et pour y donner l'essor au génie d'invention. C'est par l'heureux concours de tant de circonstances que les découvertes succèdent aux découvertes avec une rapidité sans exemple, et que nous voyons d'un instant à l'autre un nouvel ordre de phénomènes ouvrir de nouvelles voies à nos recherches.

Au milieu de ce mouvement universel de la science, au milieu des modifications plus ou moins profondes et toujours progressives qu'elle éprouve, les traités élémentaires sont nécessairement incomplets : s'ils présentent avec exactitude le tableau de nos connaissances, ce ne peut être que pour l'instant où ils paraissent ; quelques mois suffisent pour que ce tableau devienne infidèle. Ce n'est pas cependant que telle proposition qui semble vraie aujourd'hui puisse être fausse demain, car nous avons heureusement des méthodes expérimentales assez sûres pour ne pas confondre l'erreur avec la vérité : les résultats ne changent pas, ils restent constants et acquis au domaine de la science, mais ils s'étendent, ils se généralisent, et surtout, par le seul fait d'une observation nouvelle, ils peuvent souvent être démontrés d'une manière plus nette ou plus simple. Dans l'enseignement comme dans les traités spéciaux, il faut donc s'appliquer avec un soin infini, non-seulement à ne rien omettre d'essentiel, mais encore à rapprocher les expériences et les faits, et à les classer autant que possible dans un ordre logique qui les enchaîne étroitement.

C'est ce que j'ai essayé de faire avec un nouveau soin.

En 1852, j'indiquais de la manière suivante les changements que je venais d'introduire dans la sixième édition.

« Dans la première partie de la chaleur, j'ai introduit

les résultats des expériences récentes de M. Pierre sur la dilatation des mêmes liquides dont il avait antérieurement déterminé avec tant d'exactitude les densités et les points d'ébullition.

« Dans la seconde partie, on trouvera pareillement les derniers travaux de M. Person sur les chaleurs latentes de fusion, et sur les rapports très-dignes de remarque qui se manifestent entre ces chaleurs latentes et d'autres propriétés physiques des corps auxquels elles appartiennent ; les expériences de M. de Senarmont sur la conductibilité des cristaux, et un résumé des recherches si méthodiques et si précises de MM. de La Provostaye et Desains, sur la chaleur rayonnante, particulièrement en ce qui touche aux analogies des rayons calorifiques et des rayons lumineux.

« Le magnétisme, l'électricité et l'électro-magnétisme ne constituent, en réalité, qu'une seule branche de la physique, mais elle est la plus vaste et celle qui reçoit les développements les plus rapides et les plus variés. Un ouvrage élémentaire ne peut pas suivre le détail de tous les faits particuliers qu'on y observe; mais je me suis appliqué du moins à n'omettre aucun de ceux qui sont assez caractéristiques pour jeter une nouvelle lumière sur une théorie qui reste encore si imparfaite malgré tant d'efforts. Les principales additions que j'ai faites dans cette vue sont relatives à l'électro-chimie, à la galvanoplastique, aux phénomènes d'induction, au diamagnétisme, et à la *télégraphie électrique*. Il m'a semblé nécessaire, sur ce dernier point, de donner une description détaillée des divers systèmes d'appareils employés en France, en Angleterre et en Allemagne, afin de faire comprendre toutes les actions physiques et mécaniques sur lesquelles repose ce nouveau mode de communication qui porte au loin la pensée avec une fidélité et une promptitude si merveilleuses et qui est

sans doute appelé à exercer tant d'influence sur les relations sociales des peuples civilisés.

« J'ai essayé de faire entrer dans l'acoustique une partie des travaux remarquables de M. Wertheim.

« L'optique a reçu des développements considérables : les instruments ont été complétés ; un nouveau chapitre a été consacré à l'exposition des principaux phénomènes de l'optique céleste et des apparences que présentent les astres ; les recherches de M. Biot sur les lois de la polarisation rotatoire, celles de M. de Senarmont sur les substances biréfringentes et isomorphes ; celles de M. Pasteur sur les propriétés des acides et des sels organiques, et celles de M. Jamin sur les propriétés que prennent les rayons polarisés en se réfléchissant sur les milieux diaphanes, m'ont permis d'étendre beaucoup le cadre dans lequel se trouvaient resserrées plusieurs parties importantes de la polarisation.

« Enfin, M. Fizeau et M. Foucault ont bien voulu mettre à ma disposition les documents et les dessins qui m'étaient nécessaires pour faire connaître dans tous leurs détails les méthodes expérimentales si remarquables qu'ils ont suivies pour arriver, par des voies différentes, à la solution des grands et difficiles problèmes que présentait la vitesse de la lumière. »

La présente édition n'a pas exigé des changements aussi importants.

Le 1^er^ et le 2^e^ livre, la pesanteur et la chaleur, n'ont reçu que de courtes additions et quelques simplifications de détails ; il en est de même du 4^e^ et du 5^e^ livre, actions moléculaires et acoustique.

Le 3^e^ et le 6^e^ livre, électro-magnétisme et optique, sont ceux qui ont reçu les modifications les plus considérables.

En optique, ces modifications se rapportent au travail de M. Verdet, sur la polarisation rotatoire magnétique.

En électro-magnétisme, elles se rapportent au champ magnétique, aux appareils de M. Ruhmkorff, à l'appareil électro-physiologique de M. Bœck, à l'expérience de M. Foucault sur la chaleur développée dans une masse conductrice par son mouvement rapide en présence d'un aimant, aux résultats de M. Faraday sur les pouvoirs magnétiques et diamagnétiques, aux appareils télégraphiques de M. Siemens et à la transmission simultanée des dépêches par le même fil, enfin à l'horloge électro-magnétique de M. Froment.

Épinay (Seine), le 24 octobre 1855.

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE MÉTÉOROLOGIE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

Des Phénomènes naturels. — De l'espace. — Du Temps. — De la Matière. — Des Forces. — Du Mouvement. — De l'Inertie.

1. Les phénomènes naturels, qui se renouvellent sans cesse sur la terre et dans le ciel, offrent à nos yeux un si grand spectacle, et à notre curiosité un attrait si puissant, que nous sommes entraînés malgré nous à méditer sur l'ensemble des causes qui produisent des effets si merveilleux. A peine sommes-nous sortis de la première enfance que nos regards s'attachent aux divers objets que la nature nous présente : nous observons, de toute l'activité de notre esprit, la forme du sol et des montagnes ; la pesanteur des corps ; les mouvements de l'eau, de l'air et des nuages ; la voûte brillante du ciel et les apparences infiniment variées des astres sans nombre qui semblent la parcourir avec tant de régularité. Nous sommes nés observateurs, et sous ce rapport tous les hommes sont physiciens. Mais, au milieu de la multitude des phénomènes qui nous environnent, il n'est pas donné à notre intelligence de s'élever immédiatement à la connaissance des causes et des lois générales auxquelles ces phéno-

mènes sont soumis : aussi rien n'est plus curieux pour l'histoire de l'esprit humain que de suivre, à travers le développement des siècles, les idées singulières que les hommes se sont faites successivement sur les propriétés des corps, sur les éléments qui les composent, sur les principes et sur les causes qui agitent la matière, et qui maintiennent l'harmonie du monde. Quelle confusion d'hypothèses et d'erreurs, au milieu desquelles les hommes de génie ont jeté çà et là quelques vérités fécondes ! Et même de notre temps, qu'y a-t-il de plus curieux que d'interroger les divers esprits, depuis les plus vulgaires jusqu'aux plus habiles, et d'entendre leurs idées sur les phénomènes de la nature, sur les effets de l'air et de l'atmosphère, sur l'équilibre des eaux tout autour de la terre, sur les effets de la chaleur et de la lumière, sur la météorologie, sur la cause du tonnerre, par exemple, que l'on n'ose plus personnifier, il est vrai, mais que quelques personnes se représentent encore comme ayant une forme et un corps ! Quelle variété d'images et de conceptions ! quelle différence entre les hommes ! quelle différence entre les peuples ! On peut dire que dans une seule génération se retrouvent les opinions de tous les siècles : dans un esprit inculte, chez un peuple ignorant, toutes les erreurs avec tous les préjugés des siècles passés ; dans un esprit cultivé, chez un peuple ami des lumières, toutes les connaissances qui se sont transmises d'âge en âge, et toutes les lois générales auxquelles la raison a pu s'élever.

La physique, qu'on appelle aussi la philosophie naturelle, n'est qu'une partie de ces connaissances qui forment le vaste domaine des sciences de notre époque ; elle en est la partie philosophique et fondamentale. On a coutume de dire qu'elle a pour objet les propriétés des corps et les actions qu'ils exercent à de grandes distances ; c'est en effet ce qu'on peut en dire de plus simple, quand on veut absolument la définir d'une manière générale. Mais, tenter de définir une science, c'est consentir à être inintelligible, car une science ne peut pas se définir par quelque propriété caractéristique et frappante comme un objet matériel, ou comme une figure de géométrie. Ainsi on nous permettra sans doute de commencer l'étude de la physique, plutôt en donnant des notions claires et précises des objets dont elle s'occupe, qu'en essayant de donner des définitions vagues et obscures de la fin qu'elle se propose.

2. De l'Espace. — Nous concevons très-facilement les lon-

gueurs et les distances : une longueur d'un pas ou de dix pas est une chose qui nous est familière, et nous concevons avec la même facilité la distance qui nous sépare d'un point éloigné de l'horizon, ou même celle qui nous sépare du soleil ou des étoiles. Nous comprenons tous de la même manière les étendues en superficie, comme la surface d'un grand lac ou la surface de la mer, et les étendues en volumes, comme un mètre cube de marbre ou de pierre, le volume d'une maison ou celui d'une montagne. Concevons donc un mètre cube de marbre qui soit suspendu au milieu d'une masse d'eau ; nous savons qu'il peut être déplacé, et qu'à l'instant l'eau vient remplir la place qu'il occupait : mais imaginons que l'eau n'y vienne pas, qu'elle soit arrêtée de quelque manière ; ou plutôt concevons que le cube de marbre puisse être anéanti, qu'il ne reste de lui que ses six faces, et qu'elles soient capables de retenir l'eau exactement des six côtés différents. Ce volume où il n'y aurait plus de marbre, et où il n'y aurait point d'eau, ni aucune autre chose, c'est de l'*espace*, c'est l'*espace* qu'occupait le mètre cube de marbre et que nous pouvons concevoir privé de toute matière. Quelques métaphysiciens l'appellent l'*espace pur*, et les physiciens l'appellent l'*espace vide*. Nous en avons limité l'étendue pour en avoir une idée plus juste ; mais ce que nous disons d'un mètre cube pourrait se dire d'un volume beaucoup plus grand. Nous pouvons concevoir qu'une montagne s'anéantisse, depuis son sommet jusqu'à sa base, et notre esprit conserverait encore l'idée du volume ou de l'espace qu'elle occupait. Il en serait de même de tout le globe de la terre ; et il ne faut pas plus d'effort pour concevoir le volume qu'il occupe que pour concevoir le volume occupé par une bille de billard ou par un boulet de canon.

Au-dessus de nos têtes est l'atmosphère, et au-dessus de l'atmosphère est le vide du ciel. Notre esprit peut s'élever aussi dans ces régions : il peut se fatiguer à les parcourir dans tous les sens ; il rencontre, au milieu de ces espaces, des corps analogues à la terre, des astres sur lesquels il se repose ; mais quelle distance les sépare, quel abîme est au delà ? Cette voûte du ciel n'est qu'une apparence ; elle n'a rien de solide, et fût-elle solide comme du diamant, notre esprit ne s'y arrête pas ; il en pénètre la profondeur ; il poursuit l'espace au delà de cette voûte et au delà des étoiles ; il conçoit que toute limite est impossible ; il embrasse l'immensité et conçoit quelque chose de plus grand. Ainsi l'es-

pace est indéfini pour nos conceptions, et, par conséquent, infini dans la réalité.

Une portion limitée de l'espace est dans notre langage ce que nous appelons l'*étendue* ; mais il peut arriver que l'on dise l'espace d'un mètre cube, au lieu de dire l'étendue d'un mètre cube. Il n'en résulte aucune confusion pour les discussions physiques.

3. **Du Temps.** — On dit communément que l'homme, à l'aspect des phénomènes naturels, prend l'idée de succession et celle du *temps*. Ainsi, dit-on, le printemps succède à l'hiver et le jour à la nuit; voilà l'idée de succession : l'eau qui coule succède à l'eau qui s'est écoulée, le flux de la mer succède au reflux; voilà l'image du temps. Mais il n'est besoin ni de phénomènes extérieurs, ni d'aucune action produite sur nos sens, pour que nous ayons présentement l'idée du temps : nous pensons et nous avons la conscience de nos pensées; nous pensons successivement, et nous avons l'idée de succession et de continuité. Sans doute, ce phénomène intérieur ne nous permet de compter ni les heures, ni les jours, ni les années ; mais avoir l'idée du temps et avoir le moyen de le mesurer sont deux choses différentes. Tous les mouvements extérieurs pourraient être suspendus, les astres pourraient cesser de tourner, les nuages pourraient être immobiles, l'eau cesser de couler; et cependant au milieu de ce repos universel, nous saurions encore que le temps se peut subdiviser, bien que nous n'eussions plus alors aucune mesure de ces subdivisions.

L'idée du temps et celle de l'espace se retrouvent dans toutes nos perceptions et dans toutes nos idées, le néant est incompréhensible pour nous, ou plutôt, quand nous essayons de le comprendre, nous ne comprenons autre chose que l'espace et le temps.

4. **De la Matière et des divers états des corps.** — L'idée d'espace est une idée complète, qui se suffit à elle-même, c'est-à-dire que nous pouvons concevoir l'espace et rien dans cet espace ; mais elle n'est point une idée exclusive avec laquelle rien ne se puisse associer. Dans l'espace, nous pouvons concevoir l'*impénétrabilité*, et l'impénétrabilité, c'est la *matière*. On n'a pas raison de dire que la matière a deux propriétés essentielles : l'*étendue* et l'*impénétrabilité;* ce ne sont pas des propriétés, c'est une définition. On conçoit l'impénétrabilité; on l'appelle matière, et voilà tout.

Nous pouvons concevoir l'espace limité ou indéfini, et nous pouvons comprendre de même que l'impénétrabilité soit limitée ou indéfinie, qu'elle occupe un petit volume comme une goutte d'eau, ou un grand volume comme le globe de la terre. Ici se présente une autre idée fondamentale : nous pouvons concevoir que l'impénétrabilité soit continue et inséparable, ou bien qu'elle soit discontinue, et par conséquent séparable. L'impénétrabilité inséparable est ce qu'on appelle un *atome*. L'idée de grandeur ou de petitesse n'entre pour rien dans la conception d'un atome, non plus que l'idée de forme : on peut concevoir un atome très-petit ou un atome très-grand ; on peut concevoir qu'il soit rond, carré, pointu, ou de toute autre forme bizarre que l'imagination puisse inventer. Seulement, nous supposons bien que le monde entier n'est pas un grand atome, et que la matière n'est pas toute d'une pièce ; car la terre et la lune sont deux fragments de matière séparés l'un de l'autre, et à la surface de la terre nous voyons que la matière en général se brise et se désunit ; ce qui prouve assez, d'après notre définition, que la terre non plus n'est pas un atome. Sur le reste, c'est à l'expérience à nous instruire : et toutes les données de l'expérience nous portent à conclure que la matière n'est pas indéfiniment séparable en parties, qu'à un certain degré de petitesse, qui est bien au-dessous de ce que nos sens peuvent saisir, il y a des parcelles d'une grandeur finie, qui restent absolument inséparables et qui forment par conséquent de véritables atomes. Les découvertes récentes semblent surtout confirmer cette opinion, et c'est aujourd'hui celle qu'on adopte exclusivement.

Ainsi, nous adoptons l'existence des atomes comme une vérité fondamentale qui doit nous servir de guide dans nos recherches. Une réunion d'atomes est ce qu'on appelle un *corps*. Les corps auront en général un plus grand ou un plus petit volume, suivant qu'ils seront composés d'un nombre d'atomes plus grand ou plus petit ; ils auront des apparences différentes, si les atomes sont diversement arrangés pour les composer ; ils auront une différence un peu plus marquée, si les atomes diffèrent par leur forme ou leur grandeur, et enfin ils pourront être essentiellement différents, s'il existe de atomes qui diffèrent par leur nature substantielle.

Dans un volume donné d'un corps, dans une boule d'or, par exemple, on ne suppose pas que tous les atomes soient arrangés

de la même manière, et tous également distants les uns des autres; mais on est conduit à supposer que plusieurs atomes sont groupés de manière à former ce qu'on nomme une *molécule*, une *particule*, et que les molécules sont groupées à leur tour pour donner au corps sa structure et son ensemble. Ainsi deux molécules ont en général bien plus de distance entre elles que n'en ont entre eux les atomes qui les composent. C'est là le sens propre qu'on attache à ces mots, *molécules* et *particules*, qui sont à peu près synonymes; mais quelquefois on les prend dans un autre sens, comme quand on dit : les molécules des corps sont ébranlées par le choc, elles sont en vibration dans les corps sonores, elles sont dilatées par la chaleur, traversées par la lumière, etc.; alors on ne veut plus parler strictement de chaque groupe d'atomes en particulier, mais l'on veut parler, d'une manière vague, de petites portions que l'on conçoit dans l'intérieur des corps et que l'on sépare par la pensée. Enfin, quand on brise un corps, on se sert encore des mots molécules et particules pour en désigner les plus petits fragments.

Nous ne distinguons que trois états différents dans l'immense variété des corps qui sont soumis à nos observations : ces corps sont *solides*, comme les pierres, les métaux et les tissus organiques; ils sont *liquides*, comme le mercure, l'eau, l'esprit-de-vin ou les fluides des corps vivants; ou enfin ils sont *gazeux*, comme l'air. Les liquides et les gaz se désignent quelquefois par un nom commun, on les appelle des *fluides*. Une chose digne de remarque, c'est qu'un même corps peut être tantôt solide, comme la glace, tantôt liquide, comme l'eau, tantôt gazeux, comme la vapeur. Nous verrons dans quelles circonstances et sous quelles conditions se produisent ces *changements d'état;* pour le moment, il suffit de les indiquer, parce qu'ils sont connus de tout le monde, et parce qu'en y réfléchissant on habitue l'esprit à pénétrer dans l'intérieur des corps et à bien comprendre qu'ils ne sont que des assemblages ou des agglomérations d'atomes; que ces atomes sont séparés les uns des autres, et maintenus à des distances plus ou moins grandes, et qu'enfin il est possible que, sans se toucher, ils agissent de concert et se communiquent des pressions ou des mouvements.

5. Des Forces. — Les atomes simplement posés à côté les uns des autres ne pourraient constituer ni les corps solides, ni les autres corps de la nature; ils ne feraient tout au plus qu'un

amas incohérent, pareil à un monceau de sable ou de poussière. Une pierre ou un morceau de fer sont des corps solides et résistants : il faut donc qu'il y ait *quelque chose* qui retienne les atomes, qui les attache l'un à l'autre, qui les fixe à leur place. Les corps se briseraient sans effort s'il n'y avait que des atomes simplement juxtaposés, ou plutôt il n'existerait pas de corps, il n'existerait que de la poussière. Nous concevons que dans un morceau de fer un atome quelconque est pressé contre les atomes voisins, comme un bloc de pierre est pressé contre le sol; pour soulever la pierre il faut un certain effort; pour arracher l'atome, si l'on pouvait le saisir, il faudrait aussi un effort plus ou moins grand. Les *causes* de ces *pressions* ou de ces *actions mutuelles* que les diverses portions de la matière exercent les unes sur les autres, sont ce que l'on appelle en général des *forces*.

Ainsi, il y a des forces qui agissent sur les atomes de fer, qui les pressent les uns contre les autres, qui les retiennent en leur lieu, et qui donnent à la masse cette fixité que nous observons. De même, il y a des forces qui agissent sur les molécules de tous les corps solides, et qui leur donnent, à l'intérieur, une structure déterminée, et, à l'extérieur, une forme permanente. Enfin, comme il n'y a pas de corps qui n'ait une certaine manière d'être et une certaine dépendance entre ses parties, on en conclut que, là où il se trouve plusieurs atomes voisins, il y a toujours entre eux une action mutuelle, par laquelle ils se sollicitent les uns les autres et prennent un arrangement déterminé.

Les liquides, qui sont si mobiles, ont eux-mêmes cette dépendance entre toutes leurs parties voisines : une goutte d'eau a toujours une forme particulière, soit qu'on l'observe sur quelque surface ou plutôt sur les plantes où elle se dépose en rosée, soit qu'on l'observe aux extrémités des corps où elle se tient suspendue. Cette forme qu'elle prend est le résultat de l'action des molécules qui la composent, car, sans actions mutuelles, ces molécules resteraient séparées et tomberaient isolément.

L'air, qui est invisible et qui est si subtil, n'est pas une exception à cette loi générale. Il est impénétrable, puisqu'il résiste quand il est enfermé dans une vessie, dans un ballon ou dans un autre espace quelconque. Donc, il est aussi composé d'atomes et de molécules; donc ses diverses parties exercent aussi une

action mutuelle les unes sur les autres : entre mille phénomènes qui en sont la preuve, nous citerons seulement le phénomène de la respiration, qne tout le monde peut observer. L'air extérieur pénètre dans les poumons, à mesure que la poitrine s'ouvre pour le recevoir; ainsi les molécules du dehors agissent sur les molécules du dedans, elles les pressent et les forcent d'entrer, et, quand l'air est enfermé dans la poitrine, les molécules intérieures réagissent aussi les unes sur les autres pour en remplir toute la capacité, comme elles réagissent les unes sur les autres pour se répandre dans toute l'étendue d'un vase, quelque grand qu'il soit.

Ces forces, qui agissent sans cesse dans l'intérieur d'un corps entre toutes les molécules voisines, ou entre tous les atomes qui composent une molécule, s'appellent *forces moléculaires* ou *attractions moléculaires :* il serait mieux de les appeler *actions moléculaires*, ou *forces atomistiques*, ou *forces constitutives des corps*, puisqu'en effet ce sont ces forces qui donnent aux corps leurs constitutions particulières et leurs modes d'existence. Nous examinerons plus tard s'il n'y a qu'une seule force de cette nature, ou s'il y en a plusieurs qui se combattent, qui se balancent, et qui sont tour à tour plus grandes ou plus petites.

Outre les forces moléculaires, il y a des forces d'une autre nature : les corps tombent d'eux-mêmes, quand on les abandonne; les rivières coulent sans cesse; le soleil semble tourner autour de la terre : voilà des *mouvements* que nous observons, et nous jugeons dans notre pensée que la matière pourrait *exister* sans que ces mouvements fussent *produits*. Ils ne sont donc que des *effets* accidentels dus à des causes déterminées. Ces causes du déplacement des corps ou des *mouvement de translation*s'appellent aussi des *forces* ou des *puissances*. Elles ont sans doute des rapports avec les forces moléculaires, qui peuvent aussi, dans certains cas, imprimer des mouvements de translation; mais en général on les distingue, comme nous le verrons plus loin.

6. Du Repos et du Mouvement. — Les idées de *repos* et de *mouvement* sont, comme l'idée d'impénétrabilité, des conceptions simples et primitives, qui ne peuvent ni se décomposer ni se définir. On conçoit le repos, on conçoit le mouvement, on peut aider un esprit à comprendre ces choses d'une manière plus générale ou plus féconde, mais, dans aucune langue, on ne peut les expliquer ni l'une ni l'autre que par des mots équivalents. Dès que

nous avons l'idée d'espace et l'idée de nous-mêmes, nous nous prenons pour un centre autour duquel l'espace indéfini se développe, et nous avons l'idée de direction, de distance et de situations respectives. Nous avons besoin de l'aspect du ciel pour nous *orienter* par rapport au soleil et aux astres, mais nous n'avons besoin que du sentiment de nous-mêmes pour nous *orienter* par rapport à nous : à moins de tout confondre, nous ne confondons pas l'espace qui est devant nous avec l'espace qui est au-dessus de nos têtes ou sous nos pieds, ni celui qui est à droite avec celui qui est à gauche. L'homme qui a vécu dans les ténèbres, soit à la surface de la terre, soit au fond des mines, ne sait ce que c'est que l'orient, l'occident ou les pôles du monde, toutes choses qui se rapportent à l'aspect du ciel, qu'il ne connaît pas; cependant il conçoit l'espace, et par la pensée il le sépare en diverses régions qui ont rapport à lui-même; en régions latérales, antérieures et postérieures, et en régions hautes ou régions basses. Nous pouvons tous faire abstraction de la matière, sans pouvoir jamais faire abstraction de nous-mêmes ; et, une fois que nous avons de la sorte pris possession de l'espace, nous pouvons comprendre que rien ne change plus ni en nous ni autour de nous : nous avons alors l'idée de *repos* et de *repos absolu*, car on appelle repos absolu d'un corps la persistance réelle de ce corps dans le même lieu de l'espace. De même, nous pouvons comprendre qu'il arrive un changement de place; nous pouvons comprendre que nous avançons ou que nous reculons dans une de ces régions idéales, que nous allons d'un côté ou de l'autre ; que nous montons ou que nous descendons : alors nous avons l'idée du *mouvement* et l'idée du *mouvement absolu;* car on appelle *mouvement absolu* d'un corps le déplacement réel de ce corps dans l'espace.

Il y a deux choses essentielles à considérer dans le mouvement : sa direction et sa lenteur ou sa rapidité, qu'il ne faut pas confondre avec sa vitesse, dont nous parlerons plus loin. Si le *mobile*, ou le corps qui se meut, parcourt une ligne droite, le mouvement est dit *rectiligne*, et la droite parcourue par le mobile est la direction du mouvement; au contraire, si le mobile parcourt une courbe quelconque, le mouvement est dit *curviligne*, et l'on dit encore que la courbe qu'il parcourt est en général la direction du mouvement. Mais dans ce dernier cas, pour exprimer sa direction dans un instant quelconque, il faut remar-

quer qu'entre deux points d'une courbe, on peut mener une infinité de tangentes ou de lignes droites qui ne font que toucher la courbe ; alors le mobile étant en même temps sur la courbe et sur une tangente, on dit que la direction de son mouvement est celle de la tangente sur laquelle il se trouve. Ainsi, dans le mouvement curviligne, le mobile change à chaque instant de direction, et, s'il parcourt un cercle entier, il a véritablement passé par toutes les directions possibles, du moins dans un même plan. Pour la lenteur et la rapidité du mouvement, on dit en mécanique, comme dans le langage ordinaire, qu'un mouvement est plus lent quand le mobile parcourt moins d'espace dans le même temps, et qu'il est plus rapide quand il parcourt un espace plus grand. Seulement, il faut prendre garde que, de deux mouvements donnés, celui qui serait le plus lent, en ne considérant que les espaces parcourus pendant une seconde, par exemple, pourrait être le plus rapide, si l'on considérait les espaces parcourus pendant une heure ou pendant un jour ; car on conçoit qu'un même mouvement peut se ralentir avec le temps ou devenir plus rapide.

Le repos absolu et le mouvement absolu ne sont que des conceptions de notre esprit : dans l'arrangement du monde, il n'y a rien d'absolu pour nous, tout est relatif et conditionnel. Ainsi, toutes les choses qui nous paraissent les plus immobiles à la surface de la terre, ne sont que dans un repos relatif. Les arbres sont en repos par rapport aux montagnes, et les montagnes sont en repos par rapport au sol et à la masse du globe ; mais les arbres et les montagnes sont emportés avec nous dans le vaste orbite de notre planète, et tous ensemble nous parcourons en une seconde dix fois plus d'espace que n'en parcourt dans le même temps un boulet qui sort du canon. Cependant, en parcourant aussi vite les espaces du ciel, nous ne pouvons pas juger de notre mouvement absolu, car il faudrait savoir si le soleil est immobile au centre du monde. Or, tout semble annoncer que le soleil emporte avec lui toutes les planètes, comme la terre emporte avec elle son atmosphère et ses nuages, ses arbres et ses montagnes. Le soleil lui-même n'est qu'une planète imperceptible, par rapport à un autre soleil autour duquel il tourne, et cet autre soleil est sans doute emporté lui-même dans l'espace, sans qu'on puisse assigner ni même imaginer un centre fixe autour duquel toutes ces révolutions s'accomplissent.

7. De l'Inertie. — Il y a deux manières de concevoir les forces qui agissent sur la matière inorganique. On peut supposer qu'elles ont une existence séparée, qu'elles sont hors de la matière et qu'elles en sont indépendantes; ou bien on peut admettre qu'elles sont inhérentes à la matière elle-même, et qu'elles ne sont que des propriétés permanentes, qui lui ont été primitivement données. Ces deux suppositions reviennent au fond à une seule et même chose; mais, quelle que soit l'idée qu'on puisse prendre de l'origine des forces et de leur mode d'existence, il y a sur elles et sur la matière deux principes fondamentaux qui résultent de tous les phénomènes naturels qui se produisent à nos yeux et qui se renouvellent ou se perpétuent depuis tant de siècles. Ces deux principes constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière. Le premier est que, toutes les forces qui agissent sur la matière cessant d'agir à un instant donné, la matière conserve son état de repos ou de mouvement. Le second est que toutes les forces sont soumises à des lois d'une infaillible stabilité. Il résulte du premier principe qu'un atome de matière ne peut ni se donner du mouvement ni altérer celui qu'il aurait reçu; et si deux atomes de matière peuvent se donner du mouvement l'un à l'autre par leurs attractions ou en général par leurs actions mutuelles, comme l'attraction de la terre donne du mouvement à une pierre qu'on abandonne à elle-même, il résulte du second principe que ce mouvement se produit suivant une loi déterminée qui n'a éprouvé aucun changement depuis que le monde existe. Ainsi, tous les changements que subit la matière, soit dans son état, soit dans son repos, soit dans son mouvement, nous devons les attribuer à des causes ou à des forces particulières : tantôt à des forces nouvelles, qui surviennent tout à coup; tantôt à des forces permanentes, qui continuent d'agir et qui règlent leurs actions suivant les lois immuables auxquelles elles sont soumises. Si un corps se brise ou se déplace, s'il devient plus dur ou plus mou, s'il se refroidit ou se réchauffe, s'il se liquéfie ou s'il se vaporise, c'est qu'une cause est survenue qui lui imprime ces modifications. Jamais une pierre ne s'est brisée d'elle-même, jamais elle ne s'est soulevée sur le sol ; jamais on ne l'a vue ni se durcir, ni se ramollir, ni s'échauffer, ni se refroidir, ni se liquéfier d'elle-même, ni disparaître en vapeurs. Si l'on coupe le fil qui soutient un corps, on le voit qui tombe et qui se précipite d'un mouvement de plus en

plus rapide. Il fallait une cause pour le faire tomber, et c'est cette même cause qui continue d'agir et qui presse son mouvement par ces actions répetées. La terre, dans son orbite autour du soleil, éprouve des variations perpétuelles : tantôt sa course devient plus lente, tantôt plus rapide, et cependant rien n'est accidentel dans ces périodes, rien n'est fortuit ni imprévu. C'est toujours la même cause qui préside à ces mouvements, mais c'est une cause qui change d'énergie, et c'est par la loi de ces changements que se maintient l'équilibre du monde.

CHAPITRE II.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

Divisibilité. — Porosité. — Compressibilité. — Élasticité. — Dilatabilité.

8. On appelle propriétés générales des corps celles qui sont communes à tous les corps, solides, liquides ou gazeux. Celles de ces propriétés qu'il importe le plus de connaître dès le commencement de la physique sont :

1° La divisibilité;
2° La porosité;
3° La compressibilité;
4° L'élasticité;
5° La dilatabilité.

Nous remarquerons d'abord qu'elles dépendent de la structure des corps et de l'arrangement intérieur de leurs parties constituantes. Si les corps n'étaient pas composés, ils ne seraient pas divisibles, ni poreux, ni compressibles, et ils ne pourraient pas non plus avoir le ressort qui constitue l'élasticité, ni la faculté d'augmenter de volume qui constitue la dilatabilité. C'est pour cette raison qu'il ne serait pas exact de dire que ces propriétés sont des propriétés générales de la matière, car elles ne peuvent en aucune sorte appartenir aux atomes, tels que nous les pouvons comprendre et tels que nous les avons définis : ce sont des propriétés de l'ensemble, et non des propriétés des éléments.

9. Divisibilité. — Tous les corps peuvent être divisés en plusieurs parties, et ces parties elles-mêmes en particules de plus en plus petites, jusqu'à ce qu'enfin elles échappent à nos sens et à nos instruments. Cette propriété, prise en général, est la chose du monde la plus connue : chacun sait que les barres de métal se rompent sous un certain effort, que les pierres se cassent sous le marteau, et que le diamant, qui est le plus dur et le plus inaltérable des corps que l'on connaisse, peut être lui-même réduit en fines poussières qui servent à polir sa sur-

face. Mais ce qui doit nous occuper, et ce qui a dû surtout exciter la curiosité des plus anciens observateurs, c'est de savoir si tous les corps sont en effet divisibles, et s'ils le sont tous jusqu'au dernier degré de petitesse que nous puissions percevoir.

Pour les corps qui sont liquides comme l'eau, il est évident qu'ils peuvent être divisés et subdivisés en particules si petites, qu'elles soient à la fin tout ce que le toucher peut sentir de plus ténu et tout ce que l'œil peut voir de plus délié; car, en regardant un liquide, nous ne voyons sur sa surface aucune sorte d'inégalité, et en plongeant la main dans sa masse nous ne pouvons pas palper les molécules et les sentir distinctement comme nous sentirions des parcelles de sable.

Pour les solides, nous ne pouvons pas juger aussi facilement de la grosseur ou de la tenuité des dernières parties qui les composent. Rien ne nous indique d'avance que parmi ces corps il ne s'en trouve pas qui, étant divisés jusqu'à une certaine limite, se refuseraient à une division ultérieure, et dont les parties élémentaires, encore grosses et palpables, ou du moins très-perceptibles, ne pourraient plus être subdivisées davantage ni altérées en aucune manière : aussi les anciens avaient eu grand soin d'expérimenter, dans cette vue, sur tous les corps qu'ils connaissaient; et les modernes, qui ont tiré du sein de la terre tant de substances nouvelles, les ont de même éprouvées pour savoir jusqu'à quel point elles se divisent. Ce n'est qu'après toutes ces expériences qu'il a été permis de conclure que pour tous les corps connus il n'y a aucune limite perceptible à la divisibilité. Cependant il ne serait pas rigoureux d'étendre cette conséquence à tous les corps qui existent : par cela seul qu'il a fallu l'expérience pour résoudre la question, la question n'est résolue rigoureusement que pour les corps sur lesquels on a expérimenté. Ainsi, il n'est pas absolument impossible que les volcans fassent sortir un jour des entrailles de la terre quelques substances dont les atomes soient pour nous d'une grandeur perceptible, et il n'est pas impossible non plus que de telles substances se trouvent dans la masse des autres planètes.

Sans reproduire ici toutes les expériences qui ont été faites sur les différents corps, nous citerons quelques exemples pour montrer, d'une part, que nos sens ne peuvent atteindre qu'à un certain degré de petitesse, et, d'une autre part, que ces der-

nières parcelles qui commencent à nous échapper sont encore composées d'un nombre immense de parties distinctes.

C'est par le sens du toucher et par celui de la vue que nous jugeons de la grandeur des objets; le goût et l'odorat nous instruisent de certaines qualités des corps, sans rien nous apprendre de leur forme; et, chose digne de remarque, par le sens de l'ouïe, qui est chez les aveugles un instrument d'une si merveilleuse délicatesse pour juger des distances, nous ne pourrions jamais nous élever à l'idée d'une figure déterminée, ni à l'idée de la grandeur, ni à celle de la petitesse.

Le sens du toucher existe dans tous nos organes, soit à l'intérieur, soit à la surface; mais il s'exerce très-différemment. A l'intérieur, nous n'avons que des sensations vagues des corps étrangers qui nous touchent ou qui nous blessent; et, dès que le contact est un peu prolongé, toute sensation locale disparaît; nous n'éprouvons plus qu'un sentiment général; une manière d'être plus ou moins douloureuse, dont nous ne démêlons ni le siége ni la cause. C'est sans doute par une raison semblable que nous ne sentons rien en dedans de nous-mêmes, ni les substances solides, comme les os, ni les substances liquides, comme le sang, même quand elles circulent avec une grande rapidité. A l'extérieur, tous les points de la surface peuvent sentir distinctement le contact des corps étrangers; mais c'est la main qui est le véritable organe du toucher; on sait que c'est par elle que nous prenons l'idée des contours et des formes géométriques des corps, et que c'est par elle aussi que nous pouvons percevoir les objets les plus déliés. Sur une surface polie, la main exercée d'un aveugle peut sentir des grains de poussière d'une telle ténuité qu'il en faudrait des centaines, rangés à côté l'un de l'autre, pour faire la longueur d'un millimètre. Une main moins délicate peut sentir distinctement un fil de laine ou un fil de soie d'un seul brin, et cependant ces fils n'ont pour l'ordinaire que les dimensions suivantes :

	Diamètre en millimètres.		
Laine ordinaire.....	$0^{mm},05$	ou $\frac{5}{100}$	de millimètre.
Mérinos...........	$0^{mm},02$	$\frac{2}{100}$	»
Soie.............	$0^{mm},01$	$\frac{1}{100}$	»

La plupart des fourrures recherchées, comme le castor et

l'hermine, ont une finesse qui est comprise entre le mérinos et la soie, et la plupart des laines de différentes espèces sont comprises entre le mérinos et la laine ordinaire. Ces filaments, qui ont une si grande finesse et qui sont à peu près les dernières grandeurs que le toucher puisse percevoir, sont cependant des corps très-composés; chacun d'eux a une structure particulière que le sens de la vue peut seul nous faire connaître; chacun d'eux contient des éléments très-divers, qui sont préparés par la nutrition, sécrétés par les organes, et que la chimie peut séparer de nouveau et remettre en évidence.

Le verre, qui est un produit de l'art, et dans la composition duquel il entre plusieurs substances différentes, peut être filé comme la soie. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre assez fin, on le présente, vers le milieu de sa longueur, à la flamme d'une bougie, et, quand il est chauffé dans cet endroit jusqu'au rouge blanc, on tire les deux moitiés comme pour les séparer; alors il se fait entre elles un fil d'une brasse de longueur, qui a toute la finesse de la soie, et qui en a presque la souplesse; cependant ce filament de verre est encore assez épais pour former lui-même un tube ayant ses parois et son canal intérieur par lequel on peut faire passer des liquides.

Nous pourrions pousser bien plus loin les expériences sur notre sensibilité organique, si les corps ne devenaient pas trop flexibles à mesure qu'on les divise en filaments plus minces. Si, par exemple, un fil mille fois plus fin qu'un fil de soie pouvait avoir la rigidité d'une flèche, il serait curieux d'observer l'effet de ses piqûres sur les divers points de la peau; on trouverait sans doute qu'une flèche de cette espèce pourrait nous traverser le corps de toutes parts, sans se faire sentir et sans troubler le moins du monde les fonctions de la vie.

Le poli que prennent les corps est une autre preuve de la divisibilité de la matière, et le contact des surfaces polies est une autre preuve de la limite des perceptions du toucher.

L'acier poli, les métaux, le diamant et les pierres précieuses ne sont pour la main qu'une seule et même chose; en les touchant, nous ne sentons qu'une surface géométrique, et cependant toutes ces superficies sont travaillées avec les fines poussières de l'émeri ou du diamant, et chaque grain de poussière y trace un sillon proportionné à sa grandeur : voilà des cavités et des saillies que le toucher ne peut plus sentir.

Les dernières parcelles de matière qui échappent au toucher sont encore perceptibles à la vue. L'œil aperçoit sur la pierre de touche les parcelles d'or qui servent à l'essai, et dont la main la plus délicate ne sentirait pas la présence. Les bulles de savon qui donnent de si brillantes couleurs sont de minces lames d'eau, dont Newton a mesuré l'épaisseur. Auprès de leur sommet, elles n'ont ordinairement que $\frac{1}{10000}$ de millimètre, et elles se réduisent à $\frac{1}{100000}$ quand elles laissent voir une tache noire quelques instants avant d'éclater. Les ailes transparentes des insectes n'ont qu'une épaisseur à peu près pareille, et c'est pour cette raison qu'elles brillent du même éclat. Enfin les pellicules de verre que l'on souffle à la lampe ont aussi la même ténuité et les mêmes couleurs ; car c'est une loi générale que tous les corps transparents se colorent des plus vives nuances quand ils n'ont plus que quelques cent-millièmes de millimètre d'épaisseur ; mais quand ils sont plus minces, ils deviennent tout à fait invisibles. Une bulle de savon qui n'aurait que $\frac{1}{100000}$ de millimètre d'épaisseur ne pourrait être aperçue par aucun moyen, lors même qu'elle aurait un très-grand diamètre.

Pour les corps qui ne s'étendent pas en superficie, et qui ne sont grands que dans une seule dimension, comme les fils de métal ou les filaments organiques, il serait difficile d'assigner les limites de grandeur où l'on cesse de les voir nettement à l'œil nu. Ces limites dépendent de la perfection de l'organe et de l'éclat de la lumière ; mais au moyen des loupes ou des microscopes, il n'est pas besoin d'être fort exercé ni d'avoir un organe très-parfait pour apercevoir d'une manière distincte des fils qui n'ont de diamètre que quelques millièmes de millimètre.

On sait que dans les arts on emploie des fils de cuivre, de fer ou d'argent, qui sont aussi fins que des cheveux. La traction qu'on exerce pour les passer à la filière est ce qui limite leur finesse, parce qu'ils deviennent trop faibles pour y résister ; mais par divers procédés ingénieux qui ne s'appliquent qu'à certains métaux, on parvient à faire des fils qui sont plus fins que la soie. Le docteur Wollaston a fait des fils de platine qui n'avaient que $\frac{1}{1200}$ de millimètre d'épaisseur, c'est-à-dire qu'il faudrait plus de cent quarante de ces fils pour former un faisceau de la grosseur d'un fil de soie d'un seul brin. Quoique le platine soit le plus pesant de tous les corps connus, mille mètres de longueur d'un tel fil ne pèseraient pas plus de 4 ou 5 centi-

grammes. Pour arriver à ce résultat, qui paraît être le dernier terme que l'art puisse atteindre, le docteur Wollaston prend un fil de platine de $\frac{1}{100}$ de pouce anglais d'épaisseur, qu'il fixe dans l'axe d'un moule cylindrique de $\frac{1}{5}$ de pouce de diamètre; il remplit le moule d'argent en fusion, et il a ainsi un cylindre d'argent dont l'axe est de platine. En le faisant passer à la filière, les deux métaux s'allongent également, et conservent leurs rapports d'épaisseur; enfin, quand le fil composé est à son plus grand degré de finesse, on le fait bouillir dans l'acide nitrique, qui dissout l'enveloppe d'argent, et qui met à nu le fil de platine.

Puisque la matière peut s'amincir en superficie, comme dans les bulles de savon ou les lames de verre, et se rétrécir en longueur, comme dans les fils de platine, il est évident qu'elle peut s'atténuer de la même manière dans toutes les dimensions. Ainsi, nous pouvons juger que toutes les parcelles que nous apercevons encore sont des parcelles très-composées. Mais le règne organique nous en offre des preuves encore plus frappantes. On sait maintenant d'une manière certaine que le sang n'est pas un liquide uniforme tel qu'il paraît à la vue, et que sa substance se compose d'une foule de petits globules flottant dans un liquide particulier qu'on appelle le *sérum*. Cette découverte a été faite à peu près à la même époque en Italie par Malpighi, et en Hollande par Leeuwenhoek, vers 1660, environ quarante ans après que Harvey eut démontré la circulation du sang. Ces globules sont sphériques dans le sang de l'homme et dans celui des mammifères, et ils sont allongés dans les oiseaux et les poissons. Leurs dimensions varient suivant les espèces: dans le callitriche d'Afrique, ils sont les plus gros que l'on ait observés, et s'élèvent à $\frac{1}{125}$ de millimètre; dans la chèvre, ils sont les plus petits, et ne vont qu'à $\frac{1}{350}$. Les globules du sang de l'homme sont intermédiaires, et paraissent constamment de $\frac{1}{150}$ de millimètre. On peut calculer, d'après cette donnée, qu'il y en a près d'un million dans la goutte de sang d'un millimètre cube, qui pourrait être suspendue à la pointe d'une aiguille. Dans presque tous les autres mammifères, les dimensions des globules paraissent comprises entre les deux dernières limites. Ces globules ne sont pas des atomes, car ils peuvent être brisés par des actions chimiques; et ensuite ils peuvent être reconstruits; il n'y a aucun doute qu'ils ne donnent naissance à une multitude de parties distinctes quand ils passent dans la nutrition, car les fibres mus-

culaires et celles des autres tissus se composent de globules très-différents des globules du sang, et toujours beaucoup plus petits.

Enfin, il y a des animaux complets qui sont aussi petits que les globules du sang et que les plus petites choses perceptibles. Nous pouvons les voir et les étudier; mais c'est le dernier terme où la vue puisse atteindre. Ce qui est plus petit n'a plus de grandeur pour nos sens, et n'a plus de mesure; c'est le commencement de l'indéfini en petitesse où se jette notre pensée, et qu'elle poursuit indéfiniment sans trouver un point où elle se doive arrêter.

Au delà de ce dernier terme de sensibilité organique, tout cependant n'est pas hypothèse et conjecture; ces animalcules sont des êtres, et des êtres essentiellement composés de parties; ils sont organisés, puisqu'ils ont la vie et le mouvement; ils sont pourvus de sens, puisqu'ils ont la force et l'instinct. Dans les fluides où ils vivent, ils exécutent, comme les poissons, des mouvements rapides et variés; ils se dirigent vers un but, ils évitent les obstacles, quelquefois même ils les surmontent; enfin ils ont besoin d'une proie, et ils savent la chercher et la saisir. Nous verrons en optique que, dans les dernières classes des êtres visibles, les mœurs ne sont pas moins curieuses à observer que dans les classes les plus apparentes; mais dès à présent nous pouvons conclure que, dans le petit tout impalpable qui compose un individu de cette espèce, il y a des choses distinctes, des parties molles et des parties solides, des espèces d'articulations pour les mouvements, et des espèces de canaux pour les fluides; enfin que, parmi cette excessive petitesse, il y a une nutrition dans toutes les parties et une circulation nécessaires. Ainsi, le raisonnement poursuit encore la divisibilité de la matière après que nos sens ne peuvent plus la constater; et, comme l'ensemble des phénomènes de la chimie nous conduit à admettre l'existence des atomes, nous arrivons à cette conséquence définitive, que les atomes sont incomparablement plus petits que les dernières parcelles que nous pouvons saisir avec le sens le plus délicat aidé de l'instrument le plus parfait.

10. Porosité. — On appelle *pores* les intervalles qui se trouvent entre les diverses parties d'un même corps. Les espèces de trous qu'on observe dans l'éponge ne sont autre chose que des pores d'une grande dimension; les mailles plus serrées qui composent son tissu sont des pores un peu plus petits; enfin il se

trouve encore, entre ces mailles et entre les fibres qui les composent, des interstices qu'on appelle aussi des pores, bien qu'ils soient d'une telle finesse qu'ils échappent à la vue. Ainsi, quand nous concevons une éponge d'un certain volume, d'un décimètre cube par exemple, nous pouvons, par la pensée, pénétrer dans sa structure intérieure, et distinguer, dans cette étendue totale, l'espace qui est occupé par les diverses fibres de l'éponge, et l'espace très-irrégulier et très-sinueux qui reste inoccupé; nous devons même concevoir que chaque fibre, fût-elle fine comme un fil d'araignée, est elle-même composée de parties distinctes, et que ces parties sont encore séparées les unes des autres comme les fibres le sont entre elles.

Le volume, qui n'est occupé que par la substance propre d'un corps, est ce qu'on nomme le *volume réel :* l'espace apparent, qui est limité par sa forme extérieure, est ce que l'on nomme le *volume apparent.* Ainsi le volume apparent, diminué du volume réel, est précisément le volume total de tous les pores pris ensemble. Quand on presse une éponge, son volume apparent se rapproche de plus en plus de son volume réel; mais jamais on ne peut la presser au point de ne laisser aucun intervalle entre ses parties. Ainsi le volume réel est une chose que nous concevons très-facilement, mais que nous ne pouvons jamais trouver : c'est pourquoi, quand nous parlons d'un volume, c'est toujours du volume apparent. Ce que nous disons de l'éponge s'applique à tous les corps, quelle que soit leur nature, car nous avons vu par la divisibilité que tous sont composés de parties séparables, et par conséquent de parties qui sont distantes les unes des autres; ainsi, dans la réalité, tous les corps sont faits comme des éponges. L'acier et le diamant qui sont les corps les plus durs; l'or et le platine, qui sont les corps les plus compactes, ont aussi un volume apparent; il faut de même pénétrer par la pensée dans l'intérieur de leur masse, et voir, entre les atomes qui les composent, des intervalles qui sont incomparablement plus grands que les atomes eux-mêmes.

En considérant la porosité dans ce sens le plus étendu, il est rigoureux de dire, comme on le dit d'ordinaire, que tous les corps sont poreux; mais si l'on n'entend parler que de la porosité au travers de laquelle on peut faire passer des liquides ou des gaz, il n'est pas vrai que tous les corps soient poreux, car il y en a au travers desquels on ne peut faire passer aucun fluide,

quelque subtil qu'il soit. C'est cette porosité qui donne passage aux corps étrangers qu'il nous importe de connaître en ce moment, et nous allons faire voir par des exemples et par des expériences qu'il y a beaucoup de corps, même des plus compactes, qui se laissent imbiber par les fluides.

Les tissus qui sont un produit de l'art, n'étant autre chose que des assemblages de fibres entrelacées, il n'est pas étonnant que ces fibres laissent entre elles des intervalles assez grands pour que les liquides puissent y pénétrer : aussi le papier, les feutres et les étoffes sont des corps dont tout le monde connaît la porosité. Il en est de même des corps réduits en poudre; ils sont toujours perméables aux fluides : c'est pour cela qu'un monceau de sable est humide jusqu'à son sommet, et c'est aussi pour cela que le feu se conserve sous la cendre, car si l'air n'arrivait pas jusqu'au charbon, il s'éteindrait à l'instant.

Les filtres dont on se sert dans les opérations des arts et dans les expériences de chimie ne sont autre chose que des corps poreux, dont les pores sont assez grands pour laisser passer les liquides, et assez petits pour arrêter tous les corps étrangers qu'ils tiennent en suspension.

Tous les tissus naturels, soit dans le règne végétal, soit dans le règne animal, sont aussi très-poreux. Il n'est pas nécessaire de faire des expériences pour le prouver : il suffit de remarquer qu'une plante, un arbre ou un animal, n'était à son origine qu'un embryon d'un très-petit volume, car tous les germes sont petits; que ces corps se développent peu à peu; qu'il n'y a rien d'inerte ou de mort dans leur masse; qu'ils vivent partout, aussi bien à l'intérieur qu'à la surface, et qu'il faut bien que des fluides puissent circuler entre toutes les fibres pour y porter la nourriture et y entretenir la vie.

On peut ajouter qu'il y a des canaux particuliers pour cette circulation des fluides dans les corps vivants, et que leur porosité est soumise à des lois régulières comme leur organisation. Sans doute, un animal ou un arbre ne sont pas l'ouvrage du hasard, leurs parties matérielles ne sont pas entassées d'une manière confuse, comme les parcelles d'un monceau de sable. Mais, ce n'est pas le hasard non plus qui a fait les minéraux et les montagnes : leurs parties matérielles ont aussi un certain ordre, et la porosité, dans un cas comme dans l'autre, résulte de l'arrangement nécessaire que les forces donnent à la matière.

Les corps organiques qui ont perdu la vie conservent encore cette disposition vasculaire : seulement, les divers fluides, n'étant plus soumis aux forces particulières qui les dirigeaient, s'infiltrent indistinctement à travers tous les pores qui se présentent ; tantôt ils s'exhalent, et le corps vivant se dessèche comme le bois; tantôt ils restent confondus et donnent naissance à une fermentation qui les détruit.

Le bois qui est plongé dans l'eau augmente de poids et de volume ; celui qui reste dans l'air, soit dans les constructions, soit dans les ouvrages de menuiserie, se retire dans les temps secs et se gonfle dans les temps humides. Tous ces faits résultent de sa porosité, qui est très-grande, et l'on ne peut y remédier que par des peintures ou des vernis.

Les animaux et les bois pétrifiés sont une preuve frappante de la porosité, puisque la substance qui les pétrifie doit s'infiltrer au travers de la masse et pénétrer toutes les fibres.

Les substances minérales sont plus ou moins poreuses, suivant leur nature et suivant l'arrangement de la matière qui les compose. Les pierres qui sont opaques et celles dont les parties sont très-irrégulièrement arrangées sont en général les plus poreuses.

La craie et toutes les pierres qu'on nomme calcaires sont de même nature que le marbre; il n'y a de différence entre elles que dans l'arrangement des parties, et cela suffit pour que leur porosité soit très-différente. Lorsqu'on verse de l'eau sur un morceau de craie, elle est absorbée à l'instant, et pénètre dans les pores; celle qu'on verse sur un morceau de marbre reste à sa surface, et n'est point absorbée. De même, si l'on jette un morceau de craie dans un verre d'eau, on voit une foule de petites bulles qui s'élèvent, et si l'on y jette un morceau de marbre, on n'aperçoit rien de semblable. Ces bulles proviennent de l'air qui remplissait les pores de la craie, et que l'eau en chasse à mesure qu'elle y pénètre. Si l'on en veut la preuve, il suffit de briser le morceau de craie qui a séjourné dans l'eau; on le trouve mouillé jusqu'au centre, tandis que le morceau de marbre est à peine mouillé au-dessous de sa surface. Ce n'est pas que le marbre ne puisse aussi à la longue s'imbiber d'eau; mais pour faire passer les liquides dans les corps qui ne sont guère poreux, il faut en général deux conditions, beaucoup de temps et beaucoup de pression; c'est pourquoi les pierres qu'on tire du fond

des rivières ou du fond de la mer sont en général très-humides, surtout si elles viennent d'une grande profondeur; car nous verrons qu'à trois ou quatre mille mètres au-dessous de la surface de l'eau, les corps sont pressés par le poids supérieur du liquide, comme ils le seraient sous une très-forte presse.

Parmi les pierres siliceuses, comme les agates et les pierres à fusil, il s'en trouve une qu'on appelle *hydrophane*, dont la porosité se manifeste par un singulier phénomène. L'expérience en est curieuse : l'hydrophane, dans son état ordinaire, est demi-transparente; on la plonge un instant dans l'eau, et quand on l'en retire elle est presque aussi transparente que le verre. L'eau a pénétré sa masse comme l'huile pénètre le papier; les bulles d'air qui se dégagent comme dans l'expérience de la craie, montrent le progrès de l'absorption : leur volume total est égal à celui des pores accessibles à l'eau; mais, si l'on veut avoir ce volume avec plus d'exactitude, il suffit de peser l'hydrophane avant et après l'opération : la différence des poids sera le poids de l'eau absorbée, et il sera facile d'en conclure le volume.

Il y a beaucoup de phénomènes naturels par lesquels nous pouvons juger que les grandes masses minérales n'ont pas moins de porosité que les petites masses sur lesquelles nous pouvons expérimenter; on sait, par exemple, que dans les grottes les plus profondes, l'eau s'infiltre à travers les parois, et que c'est ainsi qu'elle vient déposer de toutes parts les stalactites, les stalagmites et toutes les autres cristallisations dont l'assemblage offre un spectacle si surprenant. On sait pareillement que les montagnes taillées à pic éprouvent chaque année une sorte d'exfoliation dont la porosité est une des causes essentielles. Leurs flancs s'imbibent d'humidité quand ils sont battus par la pluie ou par les vents humides; le froid de l'hiver congèle cette eau et augmente son volume; il en résulte une rupture d'adhérence dans toutes les couches superficielles, et, quand vient le printemps, tous ces petits feuillets se détachent peu à peu, et tombent jusqu'à l'automne. C'est ainsi qu'au pied des grands escarpements, s'entassent chaque année des couches à peu près de même épaisseur, dont on peut se servir en géologie pour remonter aux temps primitifs où les montagnes ont pris la disposition qu'elles conservent aujourd'hui.

Enfin, les métaux eux-mêmes donnent des preuves sensibles de porosité. Une boule d'or, remplie d'eau et soumise à une

grande pression laisse apercevoir, sur tous les points de sa surface, des gouttelettes semblables à celles de la rosée. Cette expérience fut faite, pour la première fois, en 1661, par les académiciens de Florence; elle a été, depuis, très-souvent répétée avec des métaux différents, et toujours avec le même succès.

Il résulte de ces divers exemples de porosité qu'un grand nombre de corps sont assez poreux pour se laisser pénétrer par les fluides, dès qu'ils sont en contact avec eux; qu'il y en a d'autres qui ne se laissent pénétrer qu'après un temps plus ou moins long, et sous une pression plus ou moins forte; enfin, qu'il s'en trouve, comme le verre, qui se laisseraient briser plutôt que de se laisser pénétrer. Il est à peine nécessaire de faire remarquer que tous les fluides ne sont pas également subtils pour pénétrer les corps : l'eau, l'alcool, l'éther, les diverses solutions acides ou alcalines, le mercure, l'huile, le soufre fondu, l'air et les différents gaz, ne peuvent pas s'insinuer avec la même facilité entre les interstices des corps. Il est très-heureux, pour nos expériences de physique, que le verre soit absolument imperméable à tous les fluides.

11. Compressibilité. — La compressibilité est la propriété qu'ont les corps de se réduire à un moindre volume apparent lorsqu'on les presse de toutes parts.

On sait que les tissus très-poreux sont en même temps très-compressibles, l'éponge peut être réduite au tiers, au quart ou même au dixième de son volume apparent. Le papier, les étoffes, le bois et tous les tissus qui se laissent pénétrer par les fluides, peuvent pareillement diminuer de volume, et perdre par la compression les fluides qu'ils contiennent. Il y a une foule de procédés des arts qui ne sont que des applications de ce principe.

Les pierres elles-mêmes, quand elles sont chargées d'un grand poids, se laissent comprimer jusqu'à un certain point. Les bases des édifices et les colonnes qui en soutiennent la charge en donnent des preuves très-évidentes.

Les métaux sont *écrouis* par la percussion; ils deviennent plus compactes; leurs parties se refoulent les unes sur les autres, et forment une masse plus serrée.

Les monnaies et les médailles reçoivent leurs empreintes sous l'action d'un balancier qui les frappe subitement; cette pression est si forte qu'elle façonne le métal comme la pression de la

main pourrait façonner la cire ; et non-seulement il change de forme pour se mouler sur les traits les plus déliés de l'effigie que porte le coin, mais encore il se comprime de telle sorte que la pièce frappée a sensiblement moins de volume que celle qui ne l'est pas.

Les liquides sont en général beaucoup moins compressibles que les solides; l'eau ne diminue que très-peu de volume quand on l'enferme dans une pièce de canon et qu'on la comprime par les plus fortes puissances. Le métal éclate avant qu'elle soit réduite aux $\frac{9}{10}$ de son volume. Car nous verrons dans l'un des livres suivants qu'elle ne se comprime que de $\frac{50}{1000000}$ de son volume pour chaque atmosphère, et qu'il ne faut guère que deux mille atmosphères pour faire éclater un canon.

L'air et les gaz sont, de tous les corps, ceux qui se compriment le plus facilement et ceux qui se réduisent à un moindre volume. On peut le démontrer par un grand nombre d'expériences; mais l'une des plus simples est celle du briquet à air. Cet appareil se compose d'un tube de verre de deux ou trois décimètres de longueur, et dont les parois sont très-épaisses (Pl. I, Fig. 1). Dans son intérieur, qui est parfaitement cylindrique, se meut un piston qui le ferme exactement, dans toutes les positions qu'il peut prendre. Si le tube était rempli d'eau, le piston ne pourrait pas descendre, puisque l'eau est très-peu compressible ; mais, quand il est rempli d'air, la force de la main est suffisante pour enfoncer le piston et pour réduire le volume au quart ou au cinquième de ce qu'il était d'abord. On sent que la résistance augmente à mesure que l'espace diminue, et qu'elle augmente de plus en plus ; mais, quelque effort que l'on puisse faire, on ne parviendrait jamais à pousser le piston jusqu'au fond, puisqu'il faudrait pour cela que l'air perdît son impénétrabilité, c'est-à-dire qu'il fût anéanti. Quand le piston reprend sa position primitive, l'air aussi reprend son volume primitif: ainsi il n'est pas compressible à la manière des métaux, qui reçoivent des empreintes et qui ne reviennent pas à leur volume primitif quand le balancier cesse de les presser.

Les autres gaz ont la même propriété que l'air, et tous ces corps ne sont pas seulement propres à être comprimés; mais, en vertu de leur force expansive, ils sont propres à prendre un volume beaucoup plus grand.

Si au-dessus du briquet à air on ajoutait un tube de même

diamètre, et qu'au lieu d'enfoncer le piston on le soulevât dans ce nouveau tube, l'air intérieur se répandrait partout et prendrait un volume dix fois, cent fois, mille fois, etc., plus grand; et même il ne paraît pas qu'il y ait de limite à cette expansion des gaz. Après cela, on pourrait de nouveau enfoncer le piston, et le volume se réduirait de plus en plus; on pourrait le soulever de nouveau et le réduire encore, et ainsi de suite, sans que l'air conservât la moindre trace des divers états de compression ou d'expansion par lesquels on l'aurait fait passer. C'est une constitution très-remarquable que celle de ces corps qui peuvent prendre ainsi un volume cent mille fois plus grand ou cent mille fois plus petit, sans qu'une action mutuelle entre leurs molécules cesse de s'exercer.

D'après cela, on pensera peut-être que tout l'air de l'atmosphère pourrait être enfermé dans un très-petit espace, comme par exemple dans la capacité d'une outre; mais nous verrons que, s'il n'y a pas de limite à l'expansion, il y a une limite nécessaire à la compression et à la réduction de volume.

12. Élasticité. — L'élasticité est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur état primitif quand on fait cesser la cause qui changeait leur forme ou leur volume.

L'air est parfaitement élastique; car, si l'on presse une vessie à moitié pleine d'air, elle reprend toujours son état dès qu'on cesse de la presser: pareillement, quand on a enfoncé le piston du briquet à air, il remonte de lui-même; l'air comprimé le soulève malgré le frottement, et le ramène vers le point de départ. Il en est toujours ainsi quand une cause quelconque agit sur un gaz; dès qu'elle cesse d'agir, le gaz revient exactement comme il était auparavant. C'est pour cela que les gaz s'appellent des *fluides élastiques*.

Les liquides qui ont été comprimés paraissent ne rien conserver non plus des pressions qu'ils ont supportées, ils reprennent leur volume à l'instant même où cesse l'action des causes comprimantes.

Il n'y a pas de corps solide qui soit aussi parfaitement élastique que les gaz et les liquides. Le caoutchouc, ou gomme élastique, est peut-être, de tous, celui qui a le plus d'élasticité; et cependant, soit par la chaleur, soit par de grandes compressions; longtemps prolongées ou souvent répétées, on finit par changer sa forme ou son volume.

Quoique imparfaite, l'élasticité des solides n'en est pas moins une propriété très-importante : nous l'examinerons fort en détail dans l'un des livres suivants. Ici nous nous contenterons de faire voir, par quelques expériences, qu'elle se manifeste à divers degrés dans les différents corps.

L'élasticité de l'ivoire est assez indiquée par les mouvements singuliers des billes de billard ; mais elle se montre encore d'une manière plus directe par l'expérience suivante : on laisse tomber une bille ordinaire, ou une bille grosse seulement comme une balle, sur un plan très-uni, où l'on a passé une légère couche d'huile ; à l'instant elle se relève et rebondit jusqu'à la hauteur du point de départ, ou à très-peu près. C'est là sans doute une preuve suffisante de son élasticité, et par conséquent de son changement de forme ; mais si l'on regarde sur le plan, au point où elle a frappé, on y voit une empreinte d'autant plus large que le choc a été plus vif, ce qui prouve d'une manière certaine que la bille ne s'est relevée qu'après s'être aplatie comme ferait une vessie pleine d'air ou une bulle de savon, car ces bulles si légères peuvent aussi se réfléchir contre les corps et rebondir sans se rompre. Des balles de bois, de pierre, de verre ou de métal, se comportent à peu près comme les billes d'ivoire : toutes s'aplatissent plus ou moins avant de se relever, ce qui est une preuve de leur compressibilité ; et toutes, quand elles n'ont pas été comprimées trop vivement, rebondissent et reprennent leur forme première, ce qui est une preuve de leur élasticité. Ainsi, dans le jeu des corps élastiques, il y a un double phénomène, celui de la compression ou du changement de forme, et celui du rétablissement complet de toutes les parties. Une feuille de papier, ou même une feuille de plomb, ne sont pas des corps sans élasticité, car on peut leur donner de légères flexions, sans qu'elles se rompent et sans qu'elles cessent de reprendre leur position ; mais si on les écarte un peu trop, *leur élasticité est forcée*, elles prennent le nouveau pli et ne font plus d'effort pour en revenir.

L'élasticité résultant toujours d'un dérangement des molécules, soit qu'il ait lieu par pression ou par flexion, soit qu'il ait lieu par torsion ou par traction, l'on juge aisément qu'il y a, pour chaque corps, des limites à ces dérangements, et par conséquent des limites à l'élasticité. Les corps sont d'autant plus élastiques que ces limites sont plus étendues : ainsi les billes

d'ivoire sont plus élastiques que les balles de plomb, car elles reviennent d'une compression plus grande; les lames d'acier plus que celles de verre, car elles peuvent être bien plus fléchies; les fils de soie plus que ceux de cuivre ou d'argent, car ils peuvent être tordus bien davantage; et les cordes de violon plus que les fils de fer, car elles peuvent être bien plus étirées sans cesser de revenir à leur première longueur. Mais, si l'on ne fait éprouver aux molécules d'un corps que le dérangement que son état d'agrégation peut permettre, elles reviennent toujours très-exactement à leur position, et, dans ce sens, on pourrait dire que tous les corps sans exception sont doués d'une élasticité parfaite.

13. Dilatabilité. — La dilatabilité est la propriété qu'ont les corps de changer de volume par l'influence de la chaleur, de s'agrandir quand on les chauffe, de se contracter quand on les refroidit, et de reprendre exactement les mêmes dimensions quand on les ramène exactement au même degré de chaud ou de froid.

L'air se dilate si facilement, que la simple chaleur de la main augmente de beaucoup son volume. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre très-long, d'un diamètre intérieur de 2 ou 3 millimètres, à l'extrémité duquel on a soufflé une boule. On peut, au moyen de certaines précautions, y faire entrer une colonne de liquide coloré qui se tienne vers le milieu de la longueur du tube en *m* (Pl. 1, Fig. 2) et qui sépare l'air intérieur de l'air extérieur. Cela fait, quand cette colonne est en repos, on approche la main près de la boule, et à l'instant on voit monter la colonne liquide : donc, l'air intérieur augmente de volume. Ensuite, en retirant la main, on voit la colonne qui retombe peu à peu et qui revient enfin à sa première position ; ce qui prouve qu'en reprenant le même degré de chaleur, l'air reprend aussi le même volume.

Pour faire la même expérience sur les liquides, on prend un tube semblable au précédent, que l'on remplit d'eau ou de mercure jusqu'au milieu de sa longueur en *m* (Fig. 3); ensuite on plonge la boule dans de l'eau chaude, et la colonne monte de plus en plus jusqu'en m' : au contraire, si on la plonge dans de la glace pilée, la colonne tombe en m'' ; et elle retourne encore à sa position primitive quand on la replace dans l'air, comme elle était d'abord.

Pour les solides, l'expérience peut se faire de plusieurs ma-

nières : une des plus simples consiste à prendre une barre de métal qui s'ajuste très-exactement entre deux talons métalliques, dressés à angle droit (Fig. 4) sur une plaque de bois assez épaisse. Si l'on fait rougir la barre, elle devient trop longue pour reprendre sa place, mais elle revient sur elle-même à mesure qu'elle se refroidit; et enfin, quand elle n'a plus que la chaleur qu'elle avait d'abord, elle a repris sa longueur primitive, et retombe entre les points fixes.

Ainsi, tous les corps sont dilatables, et, de tout ce qui peut changer en eux, leur volume est la chose la plus changeante. A chaque instant du jour ou de la nuit la chaleur varie, soit par l'action du soleil, soit par une foule d'autres causes, et tous les corps qui sont à la surface de la terre participent à ces variations; ils sont tour à tour plus dilatés ou plus contractés, et n'ont jamais les dimensions fixes que nous leur supposons. C'est par un mouvement de toutes les parties de l'intérieur et de l'extérieur que se produisent ces alternatives, et, si la porosité nous fait voir que ces parties ne se touchent pas, la dilatation nous fait voir maintenant qu'elles ne sont jamais en repos et qu'elles ne gardent jamais ni les mêmes distances ni les mêmes positions relatives. D'où nous pouvons conclure, enfin, que la matière la plus inerte en apparence a cependant une activité perpétuelle dans toute l'étendue de sa masse, parce que toutes ses molécules, soit au dehors, soit au dedans, sont soumises à des causes qui agissent sans cesse, et qui peuvent sans cesse éprouver des changements d'intensité.

CHAPITRE III.

DE L'ÉQUILIBRE ET DU MOUVEMENT.

Notions de Statique.

14. Un corps est en *équilibre* quand les forces qui le sollicitent se détruisent mutuellement, ou quand elles sont détruites par quelque résistance. Ainsi, un corps est en équilibre à l'extrémité du fil qui le suspend, parce que la pesanteur qui le sollicite est détruite par la résistance du fil et par celle du point de suspension : si le fil n'est pas assez résistant, il se rompt, et le corps tombe ; si le point d'attache est mal assuré, le corps l'entraîne, et tombe avec lui. Quelquefois l'équilibre a lieu sans point fixe et sans résistance apparente : les poissons les plus pesants sont en équilibre dans l'eau ; un ballon avec ses agrès, sa nacelle et les observateurs qu'il emporte, peut aussi être en équilibre dans les airs : mais alors la pesanteur qui sollicite ces corps est exactement détruite par des pressions particulières, comme nous le verrons dans un des chapitres suivants.

On peut dire que tous les corps qui nous paraissent en repos ne sont en effet que des corps en équilibre, parce qu'ils sont toujours soumis à l'action de plusieurs forces qui se détruisent mutuellement.

La *Statique* a pour objet de déterminer les conditions de l'équilibre, et la *Dynamique* a pour objet de déterminer les lois des mouvements qui se produisent quand les conditions d'équilibre ne sont pas remplies. La *Mécanique* comprend la Statique et la Dynamique, c'est-à-dire les lois de l'équilibre et celles du mouvement.

15. On ne peut mesurer les forces qu'en prenant pour unité une force convenue, comme on mesure les longueurs ou les poids en prenant pour unité une longueur ou un poids déterminés. De plus, la notion de grandeur ne s'appliquant pas directement aux forces, il faut définir avec précision ce qu'on appelle *forces égales*, *forces doubles*, etc.

Pour que deux forces soient égales, il faut qu'elles se fassent équilibre lorsqu'on les oppose l'une à l'autre sur un point ou aux extrémités d'une droite inflexible. Deux forces égales donnent une force double quand on les ajoute, c'est-à-dire quand on les fait agir dans le même sens et dans la même direction. On aurait une force triple si l'on faisait agir dans le même sens trois forces égales, et ainsi de suite.

D'après cela, si l'on convient de représenter une force par un nombre ou par une ligne, la force double de celle-là sera représentée par un nombre double ou par une ligne double, etc. C'est ainsi que nous pouvons toujours représenter les forces par des grandeurs numériques ou linéaires, et faire sur elles les mêmes opérations que nous faisons sur ces grandeurs.

16. Quel que soit le nombre des forces qui agissent sur un point, et quelles que soient leurs directions, elles ne peuvent, en dernier résultat, imprimer à ce point qu'un seul mouvement dans une direction déterminée. Or, on conçoit qu'il existe une certaine force qui serait, à elle seule, capable de produire le même effet, et cette force unique, qui pourrait remplacer l'ensemble de toutes les autres, est ce qu'on appelle leur *résultante*. Ainsi, quand un bateau se meut à la fois par la force du courant, par la force des rames et par celle du vent, on peut concevoir une force unique, un fil assez fort, par exemple, qui, étant attaché au bateau, serait tiré dans une telle direction et avec un tel effort qu'à lui seul il lui imprimât à chaque instant le même mouvement que toutes ces forces réunies; il en serait la résultante. Le courant, le vent et les rames cessant d'agir, et le fil dont nous parlons leur étant substitué, rien ne serait changé quant au résultat.

L'ensemble des forces qui concourent à produire un effet se nomme un *système de forces;* ces forces s'appellent aussi des *composantes*, quand on les considère par rapport à la *résultante* qui pourrait les remplacer. Il est évident que, si à un système de forces on ajoutait une force nouvelle qui fût égale à la résultante et dirigée en sens contraire, l'équilibre aurait lieu dans ce nouveau système de forces. C'est là la propriété caractéristique de la résultante.

Ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi, tandis que les forces du courant, du vent et des rames exercent leur action, si l'on ajoutait un fil assez résistant, dirigé en sens contraire de celui qui représente la résultante et tiré avec le même effort,

cette nouvelle force produirait l'équilibre : le bateau serait plus fixe que s'il était à l'ancre ; il ne pourrait avancer ni reculer, ni se mouvoir d'aucun côté, jusqu'à ce qu'il arrivât quelque force nouvelle ou quelque changement dans les forces agissantes pour déranger l'effort par lequel elles se détruisent.

17. Résultante de plusieurs forces qui agissent dans la même direction. — Quand toutes les forces qui agissent sur un point tendent à le mouvoir sur une même ligne, il peut se présenter deux cas : 1° si toutes les forces agissent dans le même sens, la résultante est égale à leur somme ; 2° si elles agissent les unes dans un sens et les autres dans le sens opposé, la résultante est égale à la différence des deux résultantes partielles, et agit dans le sens de la plus grande.

18. Résultante de deux forces qui agissent angulairement sur un même point. — Deux forces agissent sur le point *a* (Fig. 5), l'une dans la direction *ax*, et l'autre dans la direction *ay ;* la première est représentée en grandeur par *ab*, et la deuxième par *ac :* il est clair que le point *a* ne peut se mouvoir ni suivant *ab* ni suivant *ac*, et qu'il doit prendre une direction intermédiaire. C'est ce que le bon sens nous indique d'abord, mais c'est à peu près tout ce qu'il peut nous faire voir; car, pour déterminer et cette direction moyenne que doit prendre la résultante, et l'intensité qu'elle doit avoir par rapport aux composantes, il faut recourir à des considérations particulières dans le détail desquelles nous ne pouvons pas entrer ici. Nous nous contenterons d'énoncer le principe général de la *composition des forces*, parce qu'il est très-simple et très-facile à comprendre. Voici en quoi il consiste : on construit le parallélogramme *abrc* sur les grandeurs des deux forces données, et l'on mène la diagonale *ar*. Cette diagonale représente à la fois la *grandeur* et la *direction* de la résultante. Ainsi, le point *a*, sollicité par les deux forces *ab* et *ac*, est exactement dans le même cas que s'il était sollicité par une seule force qui serait dirigée suivant *az* et qui aurait une grandeur égale à *ar*. Ce principe est vrai pour les forces égales comme pour les forces inégales ; pour celles qui font un angle droit comme pour celles qui font un angle aigu ou obtus : c'est le principe fondamental de toute la statique ; il est connu sous le nom de *parallélogramme des forces*.

Quand les deux forces sont égales, la résultante divise toujours leur angle en deux parties égales ; mais, pour sa grandeur

elle est tantôt égale à celle des composantes, tantôt plus grande et tantôt plus petite (Fig. 6, 7 et 8).

Quand les deux forces sont inégales, la résultante divise leur angle en deux parties inégales, et elle est toujours plus rapprochée de la force la plus grande (Fig. 9).

19. Puisque deux forces peuvent être remplacées par une seule, réciproquement une seule force peut être remplacée par deux autres. On voit même qu'il y a une infinité de systèmes différents qui peuvent donner lieu à la même résultante (Fig. 10), et que, réciproquement, il y a une infinité de manières de remplacer une seule force par le système de deux autres, quand on n'exige rien ni sur leur grandeur ni sur leur direction; mais si l'on demande, par exemple (Fig. 11), de remplacer la force *ar* par deux autres forces, dont l'une soit dirigée suivant *ay*, et soit d'une grandeur *ac*, alors le problème est déterminé, parce qu'il n'y a plus qu'une manière d'achever le parallélogramme et de trouver la composante *ab*.

20. **Résultante d'un nombre quelconque de forces agissant au même point.** — Quand on sait trouver la résultante de deux forces qui agissent au même point, on trouve aisément la résultante d'un nombre quelconque de forces, car on prend la résultante des deux premières; puis la résultante de cette résultante et de la troisième force, puis celle aussi de cette nouvelle résultante et de la quatrième force, et ainsi de suite, en commençant à volonté par l'une ou par l'autre (Fig. 12).

21. **Résultante des forces parallèles.** — Quand deux forces parallèles *ab* et *cd* (Fig. 13) agissent sur une ligne *ac*, elles peuvent aussi être remplacées par une force unique qui est leur résultante, et dont on trouve l'intensité, la direction et le point d'application, par les principes suivants :

1° La résultante des deux forces parallèles est égale à leur somme quand elles agissent dans le même sens, et à leur différence quand elles agissent en sens contraire.

2° Elle est parallèle aux composantes.

3° Elle est appliquée en un point *g*, tel que les distances *ag* et *cg* soient en raison inverse des forces *ab* et *cd*. Ce point d'application de la résultante s'appelle le *centre des forces parallèles*. Une propriété remarquable de ce point, c'est qu'il reste le même quand les forces changent de direction absolue, en conservant leur parallélisme; car, si les mêmes forces agissaient suivant *am*

et suivant *en*, leur résultante passerait encore par le point *g*, puisque, les forces n'ayant point changé d'intensité, leurs grandeurs seraient encore en raison inverse des distances *ag* et *cg*.

La résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles se trouve : en composant d'abord les deux premières, puis leur résultante avec la troisième, et ainsi de suite.

22. Des couples. — Deux forces égales, parallèles et opposées, agissant angulairement sur une ligne *ac* (Fig. 14), forment ce qu'on appelle un *couple*. D'après ce que nous venons de dire, la résultante d'un couple est égale à *zéro*, et cependant le système n'est pas en équilibre; c'est un des cas très-particuliers où deux forces ne peuvent pas être remplacées par une seule. Un couple peut bien être transformé en un autre couple, on peut même le transformer d'une infinité de manières, mais jamais on ne peut le remplacer par une force unique; et par conséquent, pour un couple, il n'y a jamais de condition d'équilibre : si on le laisse agir, il fait tourner la ligne *ac* jusqu'à ce qu'il se soit déployé dans la longueur *dcab* (Fig. 16); alors il n'y a plus de couple, et l'équilibre est stable : si l'on avait reployé le couple dans la position marquée (Fig. 15), il y aurait aussi équilibre, mais équilibre instable, car, en le déployant un peu, il ferait tourner la ligne et se déploierait tout à fait.

23. Levier. — On appelle *levier* une barre droite ou courbe qui peut tourner autour d'un point fixe, qu'on appelle aussi *point d'appui* (Fig. 17 et 18).

Un levier ne peut jamais être en équilibre sous l'action d'une seule force, à moins que le prolongement de cette force ne passe par le point d'appui supposé fixe.

Un levier étant sollicité par deux forces situées dans le même plan, il y a deux conditions pour qu'il reste en équilibre : *il faut, premièrement, que ces forces tendent à faire tourner en sens contraire ; et, secondement, que leurs intensités respectives soient en raison inverse de leurs bras de levier*. On appelle *bras de levier d'une force* la longueur de la perpendiculaire abaissée du point d'appui sur la direction de cette force ou sur son prolongement : ainsi *fp* (Fig. 24) est le bras de levier de la force *ab*, et *fq* celui de la force *dc*. Ces deux forces étant supposées dans le même plan, on voit qu'elles tendent à faire tourner en sens contraire et qu'elles remplissent la première condition; mais, pour qu'elles remplissent aussi la seconde, il faut *que la*

première force contienne la seconde autant de fois que le bras de levier de la seconde contient le bras de levier de la première. Si, par exemple, *ab* est double de *cd*, il faudra que *fq* soit double de *fp*; si *ab* était mille fois *cd*, il faudrait que *fq* fût mille fois *fp*. Ces conditions d'équilibre s'appliquent à un grand nombre de machines, qui ne sont, en dernier résultat, que des systèmes de levier plus ou moins compliqués: dans le treuil et le cabestan, par exemple (Fig. 19 et 20), la résistance *r* et la puissance tangentielle *p* qui tend à la vaincre sont entre elles en raison inverse de leurs bras de levier, ou du rayon *ab* du cylindre et du rayon *cd* de la roue.

24. Pression sur le point d'appui. — Dans l'équilibre du levier, le point fixe supporte une certaine pression qu'il est utile de connaître. Pour cela, il suffit de transporter les forces au point de rencontre de leurs directions prolongées (Fig. 25), et de chercher leur résultante par la règle du parallélogramme des forces; cette résultante passe par le point d'appui, et exprime par conséquent la grandeur et la direction de la pression qu'il supporte. Si les forces étaient parallèles (Fig. 26), on sait que la résultante serait parallèle aux composantes et égale à leur somme.

25. Dans l'usage ordinaire, on emploie le levier à soulever des fardeaux : alors l'une des deux forces s'appelle la *résistance*, c'est le fardeau que l'on veut soulever; l'autre s'appelle la *puissance*, c'est la force quelconque qui est mise en jeu pour soulever le fardeau. Dans ce cas, la condition d'équilibre s'exprime en ces termes : *La puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier.*

On distingue aussi trois sortes de leviers, suivant les positions relatives du point d'appui *a* et des points d'application de la puissance *p* et de la résistance *r* : dans *le levier du premier genre*, le point d'appui est entre la puissance et la résistance : la *balance* et la *romaine* (Fig. 21) sont des leviers de cette espèce; dans celui du *deuxième genre*, la résistance est entre le point d'appui et la puissance, *pompe foulante* de la presse hydraulique (Fig. 22); dans celui du *troisième genre*, la puissance, au contraire, tombe entre la résistance et le point d'appui, *soupape de sûreté* (Fig. 23).

26. Mouvement uniforme. — Le mouvement uniforme est celui dans lequel le mobile parcourt des espaces égaux en temps égaux. Ainsi, concevons un mobile qui parcourt une ligne

droite et une horloge qui mesure le temps : si, dans chaque minute, le mobile avance de la même longueur, de 60 mètres par exemple, et dans chaque demi-minute de 30 mètres, de 20 dans chaque tiers de minute, il se mouvra d'un mouvement uniforme. Puisque les espaces sont égaux pour des temps égaux, il en résulte que le rapport de l'espace au temps est une quantité constante : c'est ce rapport qui s'appelle la *vitesse* du mouvement uniforme. Quand on prend un temps double ou triple, l'espace est double ou triple, et le rapport ne change pas. Le nombre qui représente la vitesse dépend des unités qu'on a choisies pour l'espace et pour le temps, et ce serait mal exprimer la vitesse que de l'exprimer par un nombre, sans désigner les unités qui ont servi à former ce nombre. Les mouvements uniformes sont plus lents ou plus rapides, suivant que leur vitesse est plus petite ou plus grande : le vent ordinaire ne parcourt que 60 mètres en une minute, le vent des orages parcourt jusqu'à 2700 mètres ; ce dernier mouvement est donc 45 fois plus rapide que le premier.

27. Puisque la matière est inerte, un corps qui est animé d'un mouvement uniforme doit se mouvoir perpétuellement dans la même direction et avec la même vitesse, à moins qu'une autre force ne vienne agir sur lui, soit pour changer sa direction seulement, soit pour changer à la fois sa direction et sa vitesse ; car, de lui-même, un corps ne peut rien changer, ni à son état de repos ni à son état de mouvement. C'est ainsi qu'il faut entendre l'inertie, et non pas comme l'entendaient d'anciens philosophes, qui voulaient à toute force que la matière eût un penchant pour le repos. Ils comparaient les corps à des hommes paresseux : ceux-ci, disaient-ils, cherchent le repos, ils ont horreur du travail ; de même, la matière a horreur du mouvement, elle se hâte d'entrer en repos dès qu'on cesse de la pousser ; ainsi, pour eux, inertie signifiait à peu près la même chose que paresse. Mais l'on voit, d'après ce que nous avons dit, que trois choses essentielles constituent l'inertie : 1° la nécessité d'une force pour donner du mouvement à la matière ; 2° la permanence du mouvement quand la force a cessé d'agir ; 3° la nécessité d'une force nouvelle pour changer le mouvement qu'elle a reçu.

Lorsque nous voyons un mouvement qui diminue, qui cesse ou qui change d'une manière quelconque, nous pouvons être

assurés qu'il y a quelques causes à ces changements : une pierre que nous lançons contre le soleil devrait aller jusqu'au soleil, si elle n'était arrêtée par la résistance de l'air et par la pesanteur qui la rappelle vers la terre; une bille de billard, une fois mise en mouvement, roulerait d'une bande à l'autre sans jamais s'arrêter, si elle n'éprouvait aussi la résistance de l'air et un frottement plus ou moins considérable sur les filaments du tapis.

28. La plupart des forces qui mettent les corps en mouvement n'agissent d'une manière directe que sur un petit nombre des molécules qui composent les corps. Ainsi, quand on choque une bille de billard, on ne touche que quelques points de sa surface; quand le vent pousse un vaisseau, il ne presse que les voiles; et quand la poudre lance un boulet, les gaz qui se développent et qui donnent l'impulsion ne touchent et ne pressent que son hémisphère intérieur. Cependant toutes les parties de ces corps se meuvent, aussi bien les parties sur lesquelles la force n'agit pas que les parties qu'elle pousse directement. Il faut donc qu'il se fasse un partage du mouvement entre toutes les molécules, et un partage égal, afin qu'aucune ne prenne l'avance et qu'aucune ne reste en retard : celles qui sont directement choquées poussent les voisines, celles-ci les suivantes, et ainsi de proche en proche, jusqu'à ce qu'enfin toute la masse soit ébranlée et que toutes les parties se meuvent d'un commun mouvement. Pour passer d'une molécule à l'autre, et pour se répandre dans toute la masse, le mouvement exige un certain temps qui n'est pas très-grand, mais qui n'est pas non plus infiniment court; la durée de cette diffusion du mouvement est analogue à la durée qui est nécessaire pour qu'un fluide se répande dans un vase et s'y mette de niveau : elle dépend de la masse et de la nature du corps; c'est pourquoi il n'y a jamais de mouvement qui soit absolument instantané. Ce principe s'étend à toute matière, même à celle qui entre dans la composition des corps organiques: dans l'animal le plus vif, le mouvement n'est pas aussi rapide que la pensée, il faut un certain temps très-court pour qu'il prenne son essor et sa vitesse. Un oiseau peut voir la flèche qui vient le frapper, mais si la flèche est plus rapide que les contractions musculaires, n'eût-il qu'à tourner la tête pour éviter le coup, la tête est percée avant que le jeu des muscles ait produit son effet. Il y aurait de curieuses recherches à faire sur

la rapidité de la contraction des divers organes dans les divers animaux.

29. De la quantité de mouvement. — Quand une force agit sur un corps, quand le mouvement s'est répandu dans toutes les parties de la masse, et que toutes se meuvent d'une vitesse commune, tout est fini pour la force, elle a produit tout son effet, et l'on peut dire qu'elle est passée dans le mobile, qu'elle s'y est répandue, et qu'elle y reste comme si elle y était enfermée.

Ainsi, le projectile lancé par la main, par un ressort qui se débande, par un choc rapide ou par une explosion soudaine, s'en va, parcourant l'espace, pour obéir à la force qui a produit son effet, et qui, présentement, n'agit plus sur lui. Si ce projectile ne rencontrait rien, ni l'air, ni l'eau, ni aucun fluide, ni aucun corps en repos, ni aucun corps en mouvement; si, en outre, aucune autre puissance n'agissait sur lui, il s'en irait suivant la ligne de l'impulsion qu'il a premièrement reçue, et il la parcourrait d'un mouvement uniforme sans se dévier et sans s'arrêter; après un siècle, comme après une seconde, il aurait encore la même direction et la même vitesse. Cette permanence du mouvement est, comme nous l'avons vu, l'un des attributs de l'inertie : on peut l'exprimer en disant que l'action d'une force ne dure qu'un instant, et que l'effet qu'elle produit *se continue* éternellement.

C'est ainsi que le mobile conserve l'empreinte de la force à laquelle il a été soumis; et l'on conçoit que, la force restant la même, elle produirait des effets très-différents sur des mobiles différents. La charge de poudre qui lance une balle pourrait à peine soulever une bombe, et l'on sait bien que l'arc qui lance au loin une flèche légère ne pourrait pas lancer avec la même vitesse une flèche plus pesante. On entend dire assez généralement que cette différence dépend de la pesanteur; mais c'est une explication fort trompeuse, car elle semble indiquer que, si tous les corps cessaient d'être pesants, ils seraient tous projetés avec la même vitesse, ce qui est une grande erreur. Supposons pour un moment que les corps dont nous venons de parler cessent d'être pesants, supposons même qu'il n'y ait plus d'air qui s'oppose à leur mouvement; il arriverait encore que la balle irait plus vite que la bombe, et que la flèche de bois serait aussi plus rapide que la flèche de fer, parce que la même

force appliquée à des quantités de matière différentes imprime une vitesse d'autant moindre que la quantité de matière est plus grande. Voici sur ce point important un axiome qui est un principe essentiel de mécanique : *Quand une même force agit sur des mobiles différents, elle leur imprime des vitesses qui sont en raison inverse de leurs masses ou de la quantité de matière qui les compose.* Ainsi, la même force d'explosion qui lancerait successivement des balles de plomb dont les volumes, et par conséquent les quantités de matière, seraient 1, 2, 3, 4, etc., ne leur imprimerait que des vitesses 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., tellement que la balle dont la masse serait 10 ne recevrait qu'une vitesse $\frac{1}{10}$, celle dont la masse serait 100 ne recevrait qu'une vitesse cent fois plus petite, et ainsi de suite : d'où l'on voit que, pour chacune, la masse multipliée par la vitesse donne le même nombre; car, pour la première ce produit est de $1 \times 1 = 1$, pour la seconde $2 \times \frac{1}{2} = 1$, etc. C'est ce produit de la masse d'un mobile par sa vitesse qu'on appelle *quantité de mouvement*. Il suit de là qu'une même force d'impulsion donne toujours une même quantité de mouvement, quel que soit le projectile qu'elle pousse, et qu'ainsi la quantité de mouvement caractérise une force et devient sa véritable mesure.

On dit qu'une force d'impulsion est double, triple ou quadruple d'une autre, quand elle produit une quantité de mouvement qui est double, triple ou quadruple; d'où résultent ces trois conséquences :

1° *Les forces sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles produisent, ou bien elles sont entre elles comme les produits des masses par les vitesses ;*

2° *Pour des masses égales, les forces sont entre elles comme les vitesses qu'elles impriment ;*

3° *Pour des vitesses égales, les forces sont entre elles comme les masses sur lesquelles elles agissent.*

30. De la communication du mouvement. — Quand un corps en mouvement rencontre un corps en repos ou un autre corps en mouvement, il se produit des effets très-curieux, qui dépendent de l'élasticité, de la dureté, et de la masse relative des corps. Jusqu'à présent la science n'est parvenue à faire l'analyse de ces phénomènes qu'en supposant les corps parfaitement élastiques, ou en les supposant complétement dénués d'élasticité ; hypothèses qui ne sont vraies ni l'une ni l'autre, mais d'où l'on déduit ce-

pendant quelques règles simples, qui sont très-utiles dans la pratique. Nous ne pouvons considérer ici que les corps sans élasticité, les singuliers phénomènes des corps élastiques appartiennent à la mécanique.

1° Quand deux masses égales non élastiques, et animées de la même vitesse, viennent à se choquer *directement*, elles se pressent l'une l'autre, s'arrêtent tout à coup, et restent en repos dans le lieu même où le choc a eu lieu. C'est un principe évident de lui-même, car ces masses ne peuvent rejaillir, puisqu'elles manquent d'élasticité, et l'une ne peut entraîner l'autre et la pousser devant elle, puisque tout est égal dans les deux sens opposés. Ainsi, deux balles de plomb parfaitement égales, qui seraient lancées en même temps avec la même force, arrivant l'une contre l'autre avec la même vitesse, s'aplatiraient, parce qu'elles ne sont ni assez dures ni assez élastiques, et resteraient sans mouvement. Si elles tombent après le choc, ce n'est point par un reste de vitesse qui n'aurait pas été détruit, mais bien par l'effet de la pesanteur qui agit sans cesse sur elles.

2° Ce principe s'applique aux masses inégales, sous la seule condition que leurs quantités de mouvement soient égales entre elles, c'est-à-dire que si l'une des masses est double de l'autre, il suffit que celle-ci ait une vitesse double pour être capable d'arrêter la première; une masse qui serait cent fois plus petite devrait avoir une vitesse centuple pour produire le même effet, et ainsi de suite : une balle de plomb de 25 grammes arrêterait exactement un biscaïen de 500 grammes si elle avait une vitesse vingt fois plus grande que celle du biscaïen. Deux quantités de mouvement, égales et contraires, se détruisent exactement quand l'élasticité n'est pas en jeu, parce qu'en effet deux quantités de mouvement égales et contraires n'étant en réalité, comme nous l'avons vu, que deux forces égales et contraires, il faut bien qu'elles se détruisent, quand elles ne se transforment pas.

3° Quand les quantités de mouvement sont inégales, c'est la plus grande qui l'emporte; le mobile qui en est animé repousse devant lui l'autre mobile, il le force de rebrousser chemin, et, à partir de cet instant, ils se meuvent ensemble avec une vitesse qui leur est commune.

Alors, la quantité de mouvement qui reste n'est que la différence des deux quantités de mouvement primitives, et, comme elle est appliquée à la somme des deux masses, on voit que la

vitesse restante n'est autre chose que cette différence des quantités de mouvement divisée par la somme de ces masses.

Si les mobiles allaient dans le même sens, les quantités de mouvement s'ajouteraient, et la vitesse commune qui succéderait au choc serait alors la somme des quantités de mouvement divisée par la somme des masses.

Ces conséquences s'appliquent au cas où un mobile rencontre un corps en repos; car pour avancer il est forcé de pousser devant lui ce corps en repos, et par conséquent de lui communiquer une telle quantité de mouvement qu'après le choc ils se meuvent ensemble d'une vitesse commune. Si la masse du corps en repos est égale à celle du mobile, il est clair qu'après le choc le mouvement sera également partagé entre les deux masses, et la vitesse ne devra être que moitié, puisque la masse est devenue double; elle ne serait que le tiers de la vitesse primitive si la masse en repos était double de la masse du mobile; et l'on voit qu'en général, pour avoir le rapport de la vitesse qui a lieu après le choc à celle qui avait lieu avant le choc, il faut diviser la masse du mobile par la somme des masses du mobile et du corps en repos.

Ainsi, le mouvement se communique et ne se perd jamais: quand il semble s'éteindre, c'est qu'en réalité il sort du mobile pour passer dans les corps qui se trouvent sur son chemin; il se répand de proche en proche dans tous les corps qui sont contigus à ceux-ci, et il y devient insensible par la grande diffusion qu'il y éprouve. Il faut du mouvement pour détruire le mouvement; les résistances et les frottements le dispersent et ne le détruisent jamais.

C'est d'après ces données que l'on mesure la vitesse des projectiles, au moyen du *pendule balistique*, qui est représenté dans la figure 27. Cet appareil se compose d'un axe de fer *a*, terminé en couteau par ses deux bouts, et reposant sur des appuis solides; un bloc de bois *b*, d'un poids considérable, muni d'armatures de fer, est suspendu à l'axe *a* par les deux tiges droites *t* et par les quatre tiges obliques *d*; une aiguille pointue *e* parcourt une rainure circulaire *f*, et laisse sa trace sur une cire molle destinée à la recevoir; c'est par la longueur de cette trace que l'on juge de l'écart qu'a éprouvé le pendule, lorsque le boulet est venu le frapper de front, dans la direction de son centre de gravité. La longueur du pendule est de trois ou quatre mè-

tres, et son poids total de trois ou quatre mille kilogrammes; c'est avec cette masse considérable que le projectile partage la vitesse dont il est animé; et, lorsqu'au moyen de l'écart que le pendule a éprouvé, on a pu calculer la vitesse qu'il a reçue, il est facile d'en déduire la vitesse du boulet, à l'instant où il est venu le frapper.

Il se présente dans le commencement du mouvement des phénomènes singuliers qui dépendent de l'état d'agrégation des corps et de la rapidité avec laquelle le mouvement peut se transmettre de molécule à molécule dans l'intérieur d'une même masse. On sait, par exemple, qu'une balle traverse un carreau de vitre sans le rompre, et qu'elle y fait seulement un trou, comme ferait un emporte-pièce dans une feuille de métal. Cet effet ne dépend que de la vitesse de la balle, et non pas de sa forme; car, si on la jette avec la main, elle casse le carreau tout aussi bien que le casserait une pierre. Mais, dès qu'elle s'avance avec la rapidité que lui donne la poudre, les molécules qu'elle touche sont enlevées si vivement qu'elles n'ont pas le temps de transmettre sur les côtés le mouvement qu'elles reçoivent : tout se passe alors dans le cercle que frappe la balle, et le carreau tout entier, ne fût-il soutenu que par un fil de soie, n'éprouverait pas le moindre ébranlement.

C'est par la même raison que l'on a vu souvent un boulet de canon couper en deux le fusil d'un fantassin sans que celui-ci ressentît la moindre pression, à peu près comme avec une baguette on coupe une tête de pavot sans faire fléchir la tige. Pareillement, on croyait que la bombe pourrait emporter avec elle une corde très-souple, qui n'aurait qu'à se dérouler pour suivre le mouvement, et que de cette manière on pourrait sans danger porter un prompt secours à une grande distance, soit dans les naufrages ou les incendies, soit dans d'autres pressantes détresses; mais à l'expérience on n'a pu réaliser cet ingénieux projet; la corde casse, et ne suit point la bombe, à moins qu'elle n'ait une ténacité particulière. Il faudrait un projectile dont la vitesse s'accrût assez lentement pour que l'adhésion des molécules pût résister aux secousses; car nous devons considérer la force d'adhésion qui unit les molécules des corps, comme une sorte de lien immatériel qui ne peut supporter qu'un certain effort sans se rompre. Une molécule étant tirée, et l'autre étant en repos, le lien se brise si elle est tirée trop vivement, et, dans

un temps donné, il ne peut passer ainsi d'une molécule à l'autre qu'une quantité de mouvement donnée.

Le mouvement produit par une explosion, soit par celle de la poudre, soit par celle de l'air ou de la vapeur comprimés, est un mouvement qui se communique essentiellement dans tous les sens. Les parois du canon empêchent l'expansion latérale, et tout l'effet se porte dans le sens de la longueur ; mais, là, il se produit également dans les deux directions contraires, c'est-à-dire en avant pour pousser le projectile, et en arrière pour repousser la culasse, le canon et toutes les pièces qui en dépendent. Ces deux quantités de mouvement, qui sont toujours opposées, sont aussi toujours égales ; de là vient le *recul*, qui accompagne inévitablement le départ du projectile. Si le fusil n'est pas repoussé contre l'épaule avec toute la vitesse de la balle, et si le canon et ses affûts ne reculent pas aussi vite que part le boulet, c'est seulement parce que les projectiles ont beaucoup moins de masse que les armes qui servent à les lancer. Quand un chasseur tire un coup de fusil, son épaule éprouve la même pression que si une balle venant du dehors entrait dans le canon et en frappait le fond avec toute la vitesse de la balle qui sort.

On conçoit qu'il suffit de connaître le poids de l'arme, le poids du projectile et la vitesse du recul, pour en déduire la vitesse du projectile à son départ. C'est une méthode qui a été employée avec succès par Robins. Une circonstance digne de remarque, et qui est une autre preuve de la lenteur avec laquelle le mouvement se répand dans toute l'étendue d'une masse considérable, c'est que le recul ne commence à être sensible que quand le boulet est sorti du canon. L'expérience en fut faite pour la première fois à la Rochelle, vers 1627, par les ordres du cardinal de Richelieu. On avait suspendu un canon à l'extrémité d'un grand levier mobile, et le boulet qui en sortait venait frapper le but, comme si le canon n'avait pu faire son recul que dans la direction même du mouvement du projectile.

La résistance des milieux n'est qu'un effet de la communication du mouvement. Quand un corps se meut dans l'eau, il est forcé d'écarter la couche qu'il rencontre, et tout le mouvement qu'il lui donne est autant de mouvement qu'il perd ; puis, à mesure qu'il avance, il rencontre d'autres couches en repos, les écarte pareillement, et perd ainsi de nouvelles quantités de mouvement. Il en est de même pour tout autre milieu, tel que

celui de l'air, d'un gaz ou d'un fluide quelconque. On admet dans tous ces phénomènes un principe général, savoir : que la *résistance d'un milieu* est proportionnelle au *carré de la vitesse* du corps qui le traverse, et voici la raison que l'on en donne : Quand la vitesse devient double, le corps parcourt une fois autant d'espace dans le même temps, et de là résulte : 1° qu'il rencontre une fois autant de molécules auxquelles il donne du mouvement, ce qui lui fait déjà une perte double ; 2° que comme il va une fois plus vite, il donne à ces molécules une fois autant de vitesse, ce qui double encore sa perte et la rend ainsi quatre fois plus grande. Donc, quand la vitesse devient 2, la perte devient 4, qui est le carré de 2. On voit de même qu'avec une vitesse triple il rencontre trois fois autant de molécules, auxquelles il donne trois fois plus de vitesse, ce qui fait une perte neuf fois plus grande, et ainsi de suite. Pour des vitesses égales dans des milieux différents, les pertes dépendent de la quantité de matière que contiennent ces milieux sous un volume donné, et de la cohésion ou de la viscosité plus ou moins grande qui existe entre les molécules.

31. De la Force centrifuge. — Concevons une petite boule sans pesanteur attachée à l'extrémité d'un fil inextensible *m* (Fig. 29) et supposons qu'on lui donne une impulsion pour la faire tourner autour du point *c*, comme la pierre d'une fronde tourne autour de la main. Il est clair que la boule décrira un cercle entier, puis un autre cercle, et ainsi de suite indéfiniment ; s'il n'y avait pas de résistance, ce serait un mouvement perpétuel, et perpétuellement uniforme. La vitesse de ce mouvement circulaire est égale à l'espace divisé par le temps, comme celle du mouvement rectiligne. En même temps le fil éprouve une tension, car, si on le coupe à un instant donné, la boule ne se mouvra plus en cercle comme elle le faisait auparavant, mais elle ira droit devant elle, en suivant la tangente sur laquelle elle se trouve. C'est la cause de cette tension du fil qu'on appelle *force centrifuge*, parce qu'en effet c'est l'effort que fait la boule pour fuir le centre, ou, ce qui revient au même, c'est l'effort qu'il faut faire pour la retenir et l'empêcher de s'en éloigner.

Quand la pierre d'une fronde tourne lentement, la corde est peu tendue ; quand elle tourne vite, la corde se tend davantage ; ainsi la force centrifuge est dépendante de la vitesse de rotation, elle croît et décroît avec elle dans un certain rapport. On dé-

montre en mécanique que dans les cercles inégaux, qui sont décrits dans le même temps, les forces centrifuges sont proportionnelles aux rayons. Par exemple, dans une roue horizontale ou verticale qui tourne autour d'un axe, la force centrifuge sera proportionnelle à la distance au centre.

L'appareil représenté dans la figure 28 montre cet effet d'une manière frappante : lorsque le ressort *ab* est en repos, il est à peu près circulaire ; mais, aussitôt qu'on le fait tourner autour de son axe *c*, au moyen de la manivelle *m*, et de la corde croisée *d*, le ressort *ab* devient elliptique, et s'affaisse d'autant plus que la vitesse est plus grande, les points les plus distants de l'axe étant ceux qui s'en écartent le plus par l'effet de la force centrifuge.

Pour des cercles égaux, décrits dans des temps différents, les forces centrifuges sont en raison inverse des carrés des temps.

Si le mouvement n'était pas circulaire, s'il suivait une autre courbe quelconque, il n'y en aurait pas moins une force centrifuge ; mais alors elle serait évaluée d'une autre manière. Dans tout mouvement curviligne la force centrifuge existe, et il faut toujours, pour l'empêcher d'avoir son effet, ou un fil qui retienne le mobile, ou une résistance qui l'empêche de s'éloigner, ou enfin une force attractive qui agisse sans cesse sur lui et qui le presse vers le centre de rotation, autant que la force centrifuge le pousse à s'en écarter.

32. **Mouvement uniformément accéléré.** — On appelle *mouvement varié*, en général, le mouvement rectiligne ou curviligne dans lequel la vitesse change à chaque instant. Le mouvement est dit *accéléré* si la vitesse va en augmentant, et *retardé* si elle va en diminuant. On conçoit qu'il y a une infinité de mouvements variés, car la vitesse d'un mobile peut changer en plus ou en moins d'une infinité de manières différentes. En général, dans les mouvements variés de la nature, la vitesse change suivant des lois assez simples pour qu'on puisse analyser toutes les circonstances que présente le mobile, pendant des temps très-considérables.

33. Dans le mouvement varié la vitesse n'est pas le rapport de l'espace au temps, comme dans le mouvement uniforme. Concevons un mobile qui se meuve d'un mouvement accéléré ou retardé, d'une manière quelconque : puisque son mouvement n'est pas uniforme, c'est qu'à chaque instant il y a une

force nouvelle qui vient troubler l'uniformité, qui vient agir dans le même sens du mouvement pour en augmenter la vitesse, ou en sens contraire pour la diminuer ; c'est là la cause nécessaire de la variation. Réciproquement, si, à une époque quelconque du mouvement varié, aucune force nouvelle ne venait agir sur le mobile, il est clair que toute variation cesserait à l'instant, et que le mobile continuerait de se mouvoir en ligne droite et d'un mouvement uniforme. Or, la vitesse de ce mouvement uniforme qui succèderait ainsi au mouvement varié, si aucune force nouvelle ne survenait pour soutenir la variation, est précisément ce que l'on nomme la *vitesse du mouvement varié*.

Le mouvement *uniformément accéléré* est une espèce particulière de mouvement varié, c'est celui dans lequel la vitesse croît proportionnellement au temps ; on peut le définir aussi, en disant qu'il est le mouvement produit par une force *accélératrice constante*, c'est-à-dire par une force qui agit toujours sur le mobile, et qui a toujours la même direction et la même grandeur ; car on démontre en mécanique qu'il n'y a que les forces de cette nature qui puissent imprimer au mobile des vitesses qui, après des temps 2, 3, 4, deviennent doubles, triples ou quadruples.

34. Toutes les lois du mouvement uniformément accéléré sont comprises dans les deux formules suivantes :

$$v = gt,$$
$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles t est le temps qui s'est écoulé depuis le départ du mobile, g la vitesse qu'il a acquise après une unité de temps, v celle qu'il a acquise après le temps t, et e l'espace total qu'il a parcouru dans le même temps. De ces quatre choses, deux étant connues, on peut trouver les deux autres. Nous en verrons de très-utiles applications en traitant de la pesanteur.

FIN DES NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

CHAPITRE PREMIER.

Des effets de la pesanteur et de sa direction.

35. Les corps tombent quand on les abandonne à eux-mêmes, et ils tombent jusqu'à ce qu'ils touchent la terre ou quelque autre corps qui les soutienne. Ce phénomène se produit à la surface du sol, comme on l'observe tous les jours; il se produit à de grandes hauteurs dans le ciel, comme on peut en juger par la grêle et par la pluie qui tombent des nuages, et il se produit encore à de grandes profondeurs sous terre, comme on le voit dans les puits, dans les caves et dans les mines les plus profondes que l'on ait pu creuser : quand on voit des montagnes qui s'affaissent, c'est qu'elles manquent par leur base, qui sans doute est encore plus enfoncée que le fond des mines; elles *tombent*, faute d'avoir un appui qui soit assez ferme pour les soutenir. Cependant, la matière étant inerte, et ne pouvant d'elle-même ni prendre du mouvement ni changer celui qu'elle a, il est clair que d'elle-même elle ne pourrait descendre vers la terre, puisque ce serait se donner un mouvement; il faut donc qu'il y ait une force qui la fasse tomber, c'est cette force qu'on appelle *pesanteur*.

Ainsi la *pesanteur* est la force qui fait *tomber* les corps. Mais cette définition donnerait de la *pesanteur* une idée tout à fait incomplète, si l'on supposait qu'elle ne pût produire d'autre effet que de faire *tomber* les corps. Il faut s'attendre à voir cette force produire encore beaucoup d'autres phénomènes et beaucoup d'autres mouvements, qui sont désignés dans le langage usuel par des mots très-différents. Tels sont, par exemple, les mouvements des liquides qui s'écoulent des vases et le mouvement des fleuves qui coulent vers la mer; tels sont les mouvements du liége et des corps légers qui s'élèvent du fond de l'eau

à sa surface; tels sont encore les mouvements de la fumée, des brouillards et des ballons qui s'élèvent dans les airs. Tous ces phénomènes, qui semblent si contradictoires, ne sont que des effets variés de la même force que nous venons d'appeler *pesanteur*.

Pour embrasser dans toute son étendue l'étude d'une force aussi féconde en résultats, nous aurons donc à rechercher tous les phénomènes différents qu'elle peut produire, et à déterminer ensuite les lois des actions qu'elle exerce, suivant les lieux qu'occupent les corps, suivant les arrangements de leurs parties et l'espèce de matière qui les compose.

Nous voyons d'abord que la pesanteur agit sur presque tous les corps qui se présentent à nos observations, mais qu'elle agit sur eux pour les faire tomber avec des vitesses très-différentes. Les pierres et les métaux tombent très-vite, le bois et les autres substances végétales tombent plus lentement : et il existe des corps, comme les plumes, les duvets et les flocons de neige, qui semblent à peine pesants, car ils flottent dans les airs et ne tombent qu'avec une grande lenteur. Il résulte déjà de ce premier aperçu que si la pesanteur n'est pas une force universelle, c'est au moins une force très-générale, car il n'y a qu'un petit nombre de corps, comme la flamme et la fumée, qui semblent se soustraire à son action. C'est là du moins ce qui arrive en nos climats, et ce dont nous sommes témoins dès les premiers jours de notre enfance; mais la terre est si grande qu'il est curieux de savoir ce qui se passe en d'autres lieux, sur les mers éloignées, sur les îles ou sur les continents qui n'ont plus les mêmes saisons, ni la même position par rapport à l'axe du monde. C'était aux voyageurs à nous l'apprendre, et les voyageurs nous assurent que, si d'un pays à l'autre on voit changer les hommes, l'aspect du ciel et les productions du sol, il y a toujours une chose qui, au milieu de tant de variations, n'éprouve point de changement: c'est la force de la pesanteur. Partout elle agit de la même manière, soit au milieu des mers ou des continents, soit dans les régions des pôles ou de l'équateur. Que s'il se trouve quelques legères différences, elles ne sont pas sensibles dans les phénomènes ordinaires; et il est vrai de dire que non-seulement la pesanteur agit sur presque tous les corps, mais encore qu'elle agit à peu près de la même manière dans tout le vaste contour du globe de la terre.

36. Direction de la Pesanteur. — Pour déterminer la ligne suivant laquelle tombent les corps, on pourrait les suivre de l'œil et approcher une règle droite dont ils dussent raser le bord; mais il y a un meilleur moyen, qui est de fixer un fil par un bout et d'attacher à l'autre bout un corps un peu pesant. La direction du fil, quand il sera tendu et en repos, sera précisément la direction de la pesanteur, car, si cette force agissait suivant une autre ligne, elle tirerait le fil et l'entraînerait suivant cette autre ligne. Ce petit instrument s'appelle un *fil à plomb* ou un *pendule*, et sa ligne de repos s'appelle la *verticale* (Pl. 1, Fig. 30); ainsi, la direction de la pesanteur est celle du fil à plomb ou de la verticale, et rien n'est plus facile que de la trouver à chaque instant dans tous les lieux de la terre.

Supposons qu'après avoir fait cette expérience hier, nous la recommencions aujourd'hui, nous serons fort embarrassés de savoir si le fil à plomb n'a pas changé dans l'intervalle. Il faudrait avoir quelques points fixes où l'on pût rapporter ses directions pour les comparer ensuite. Un édifice très-solide n'a pas assez de stabilité pour cet objet, car si, après un certain temps, nous trouvions que le fil à plomb n'est plus au même alignement par rapport à ses murs ou à ses arêtes, nous serions encore très-embarrassés pour une conclusion; nous saurions bien que quelque chose est changé, mais nous ne saurions pas si c'est dans la direction de la pesanteur ou dans la stabilité de l'édifice. Les flancs ou les arêtes d'une montagne ne seraient pas des marques moins incertaines; car, sur la terre, une montagne aussi est une chose instable; il faut moins qu'un tremblement de terre pour l'ébranler sur sa base. Ainsi, tout est mobile autour de nous, et nous n'avons pas un point fixe, ni sur la terre ferme, ni sur les montagnes, pour juger si la pesanteur est constante ou si elle change à mesure que les siècles s'écoulent.

Heureusement, nous avons un autre moyen : la surface de la mer, toute mobile qu'elle est, nous offre dans sa direction générale et dans ses limites la plus grande stabilité que nous puissions observer sur la terre; car un changement de niveau, même très-petit, amènerait de grandes inondations et peut-être un déluge. Or il arrive, non pas fortuitement, mais par une raison que nous verrons plus loin en hydrostatique, il arrive que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface des

eaux tranquilles; donc, si la pesanteur changeait, la mer changerait, et c'est par là seulement qu'on peut juger de la fixité de sa direction.

Au lieu de dire que la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, on dit quelquefois qu'elle est perpendiculaire à la surface de la terre; et voici alors ce qu'on entend par la surface de la terre. Ce n'est pas, comme on le suppose bien, la surface apparente avec ses montagnes et ses vallées, mais c'est une surface idéale que l'on conçoit de la manière suivante : supposons que l'océan Atlantique, la mer du Sud et toutes les mers qui communiquent entre elles, soient tranquilles pour un moment, leur immense plage formera une portion de surface à peu près sphérique, dont le contour sera déterminé par les sinuosités des rivages. Imaginons maintenant que les diverses parties de cette surface se prolongent en conservant leur courbure et en pénétrant sous les terres, et qu'elles se rejoignent de toutes parts au-dessous des continents; elles formeront alors un globe complet parfaitement uni, n'ayant ni montagnes ni vallées. C'est cette surface, réelle en partie, et en partie idéale, qu'on appelle *surface de la terre*, *surface de niveau*, *surface horizontale*, car toutes ces expressions sont synonymes. Quand on dit que l'Observatoire de Paris est à 65 mètres audessus de la surface de la mer, c'est comme si l'on disait que cette surface prolongée passe sous le premier étage de l'Observatoire, à une profondeur verticale de 65 mètres. Au contraire, il y a des plaines en Hollande qui sont au-dessous de la mer, c'est-à-dire que la surface prolongée passe sur la tête des habitants.

La *surface de la terre*, telle que nous venons de la définir, pourrait, avec le temps, s'élever ou s'abaisser, s'éloigner ou se rapprocher du centre; mais si, par quelque cause intérieure ou extérieure, elle pouvait perdre sa forme, à l'instant la terre changerait son mouvement diurne, elle sortirait de l'orbite qu'elle parcourt depuis tant de siècles, et serait peut-être poussée dans quelque autre coin de l'univers. C'est ainsi que de la stabilité de la surface des eaux dépend la stabilité de la terre et du monde.

La surface d'un lac, soit dans les plaines, soit dans les montagnes, est aussi une surface de niveau, c'est-à-dire que, si de ses rivages on abaissait des perpendiculaires sur la surface que nous venons de définir, elles y détermineraient une portion de

surface qui serait semblable à celle du lac, et dont tous les points en seraient à la même distance. Il en est de même pour les surfaces des eaux tranquilles, soit au fond des puits, soit dans des vases de grandes dimensions : toutes ces surfaces sont horizontales, et toutes perpendiculaires à la direction de la pesanteur.

Il résulte de ces vérités fondamentales, que toutes les directions de la pesanteur concourent vers le centre de la terre, car toutes les perpendiculaires à une surface rigoureusement sphérique concourent à son centre. Ainsi, *abpdx* (Pl. 1, Fig. 31) représentant la section de la terre qui serait faite par le méridien de Paris, et *ax* étant l'axe de rotation, il arrive, par les distances en latitude, que Paris se trouve en *p*, son horizon suivant *ph*, et son fil à plomb suivant *pc*; que Dunkerque est en *d* à une distance de 2° 11′ 56″, la ligne horizontale de Dunkerque en *dh′*, et son fil à plomb suivant *dc*; enfin, que Barcelone est en *b* à 7° 28′ 29″ plus au midi, l'horizontale de Barcelone en *bh″* et son fil à plomb en *bc*.

Un observateur qui serait assez loin de la terre pour voir en même temps le fil à plomb de Paris et celui de Barcelone, verrait qu'en effet ils sont inclinés l'un à l'autre de 7° 28′ 29″, et pourrait en conclure qu'ils concourent vers le centre de la terre. Quand on fait des expériences dans une petite étendue, comme dans un appartement ou même dans une grande ville, les fils à plomb semblent tout à fait parallèles, parce que le centre de la terre, qui est le point où ils tendent, est à une distance d'environ 1432 lieues de 2280 toises, ou de 6360 kilomètres : or, 1 kilomètre, par exemple, étant $\frac{1}{6360}$ de cette distance, deux fils à plomb, qui sont à 1000 mètres, ne font en effet qu'un angle de 32″. Mais, puisqu'il en est ainsi, on ne comprend pas d'abord comment on peut mesurer l'angle des verticales de deux points; car, si ces points sont très-près, l'angle est si petit qu'il échappe aux mesures, et, s'ils sont très-loin, on ne peut plus voir en même temps ni les deux verticales ni l'angle qu'elles font entre elles; toute mesure paraît donc impossible; elle le serait, en effet, si nous n'avions pas dans le ciel des points d'observation qui servent à nous guider. Les étoiles sont comme des jalons pour les habitants de la terre : c'est en les observant que nous pouvons mesurer nos angles et tracer nos alignements. La distance du soleil à la terre est de 150 millions de kilomètres,

celle de la terre aux étoiles est au moins 400 ou 500 mille fois plus grande; ainsi, en quelque point de son orbite que soit la terre, et en quelque point de la surface de la terre que soit un observateur, les rayons visuels dirigés sur la même étoile sont des lignes toujours parallèles.

D'après cela, quand une étoile passe au méridien, et qu'on l'observe en même temps à Dunkerque et à Paris, les deux rayons *de'* et *pe* (Fig. 32) sont parallèles, mais les angles qu'ils font avec leurs verticales sont inégaux, et l'angle de Paris *epv* est justement égal à l'angle de Dunkerque *e'dv'*, plus à l'angle *vcd* des deux verticales, qui est par conséquent la distance angulaire de Dunkerque à Paris.

Voilà donc comment se dirige la pesanteur tout autour de la terre, et voilà comment il est possible de comparer sa direction dans les différents lieux. Il y a une conséquence qui se présente naturellement, c'est qu'après avoir observé l'angle des verticales de Dunkerque et de Paris, après l'avoir trouvé de 2° 11′ 56″, on peut mesurer en toises ou en mètres la distance de ces deux villes; et, connaissant ainsi la longueur de cet arc de 2° 11′ 56″, on peut en conclure la longueur de la circonférence de la terre tout entière, et ensuite la valeur de son rayon, comme nous le verrons dans un des chapitres suivants.

CHAPITRE II.

De la Chute des corps et des Lois de la pesanteur.

37. Lorsqu'on laisse tomber de la même hauteur une balle de plomb et un petit disque de papier, on est frappé de la différence de leurs vitesses. La balle tombe très-vite, et le papier très-lentement, on peut même remarquer que le premier de ces corps tombe d'aplomb, et suivant la verticale, tandis que le deuxième, plus ou moins dévié de sa route, parcourt toujours une ligne sinueuse. C'est l'air qui produit cet effet. Les corps ne peuvent pas tomber sans le déplacer, et par conséquent sans partager avec lui leur mouvement, et, dans ce partage, le papier perd plus que le plomb. On obtiendrait des effets analogues et encore plus marqués, si l'on faisait tomber différents corps dans un tube plein d'eau, parce que la résistance de l'eau est plus grande que celle de l'air.

38. Pour trouver le vrai mouvement des corps pesants, il faudrait donc les faire tomber dans le *vide* (**2**), c'est-à-dire dans un espace où il n'y eût ni air, ni eau, ni aucune autre matière capable d'offrir de la résistance et de combattre l'action de la pesanteur. Un tel espace s'obtient au moyen de la *machine pneumatique*, qui fait le vide en aspirant l'air, comme nous le verrons plus loin. Au moyen de cette machine, on fait l'expérience de la chute des corps de la manière suivante.

On prend un tube de verre d'environ deux mètres de longueur, fermé par un bout, et muni à l'autre bout d'un robinet de forme ordinaire, capable de *tenir le vide;* par l'ouverture du robinet, on fait passer dans le tube des morceaux de plomb, du papier, des plumes, etc.; on fait le vide avec beaucoup de soin, et on ferme le robinet. Alors, en tournant promptement le tube, pour le mettre dans la verticale, on voit tous ces corps tombant librement dans son intérieur venir au même instant frapper le fond.

On peut modifier cette expérience de manière à rendre sensible le progrès du phénomène : on entr'ouvre un peu le robi-

net, et on le ferme presque aussitôt; alors un peu d'air est rentré, car on en a entendu le sifflement; et, en retournant le tube comme la première fois, on observe un peu de différence dans le temps de la chute; la plume et le papier sont en retard sur le plomb. Un peu plus d'air rend le retard un peu plus long, et ainsi progressivement : tant qu'à la fin, l'air étant complétement rentré, la chute se fait dans le tube comme elle se fait à l'air libre.

Ainsi, quand la pesanteur agit seule, quand elle n'est combattue par aucune résistance qui gêne ses effets, elle sollicite tous les corps avec la même énergie, et leur imprime la même vitesse, quel que soit leur poids, et quelle que soit la substance qui les compose. Dans le vide, une masse d'or d'un kilogramme ne tomberait pas plus vite qu'une parcelle d'or en feuilles, ni plus vite qu'un morceau de papier; une montagne ne tomberait pas plus vite qu'une plume.

Après avoir montré que, dans la réalité, tous les corps tombent avec la même vitesse, il faut chercher quelle est cette vitesse commune qui règle la chute de toute espèce de matière, et, en général, quel rapport existe entre l'espace que parcourt un corps pesant et le temps qu'il emploie à le parcourir. Ce rapport sera la loi de la pesanteur, c'est-à-dire la loi du mouvement que la pesanteur imprime à la matière.

Cette question ne peut pas être résolue d'une manière directe, parce que la vitesse des corps qui tombent prend une accélération si rapide qu'au bout de très-peu d'instants il n'est plus possible de noter les espaces qu'ils parcourent. Mais, ce qui ne peut pas être obtenu par des observations directes s'obtient par divers moyens indirects : le plus simple est le *plan incliné de Galilée*, mais le plus rigoureux est la *machine d'Atwood*.

39. **Plan incliné de Galilée.** — Ce qu'on appelle plan incliné de Galilée n'est, à vrai dire, qu'une ligne inclinée, sur laquelle on fait rouler un mobile : c'est une corde très-unie, de 10 ou 12 mètres de longueur, que l'on tend entre deux points fixes, dont l'un est plus bas que l'autre, et sur laquelle on fait rouler un petit char, ou plutôt une poulie de métal convenablement disposée. La pesanteur de la poulie serait complétement détruite si la corde était horizontale; elle aurait toute sa force si elle était verticale; et, comme la corde a un certain degré d'inclinaison, la pesanteur de la poulie est réduite dans une certaine

proportion. Il est facile de voir, par les règles de la statique, que sa valeur sur le plan incliné est égale à sa valeur primitive multipliée par le sinus de l'inclinaison du plan. Mais, quel que soit le rapport dans lequel on diminue une force, qu'on la réduise à la moitié, au tiers ou au quart de sa grandeur, on ne change que le mouvement absolu qu'elle imprime, sans rien changer au rapport des espaces parcourus dans des temps donnés. Ainsi, la loi que nous allons observer sur cette corde inclinée sera la vraie loi de la pesanteur. Or, si on laisse couler le char à un instant donné, si l'on note les espaces qu'il parcourt dans la première seconde, dans les deux premières secondes, etc., on trouve que ces espaces parcourus sont entre eux comme les carrés des temps employés à les parcourir. Donc, le mouvement que la pesanteur imprime suit la même loi; c'est-à-dire que la pesanteur est une force accélératrice constante (**34**).

40. **Machine d'Atwood.** — Cet appareil est représenté (Pl. 2, Fig. 1, 2 et 3). Mais, pour la simplicité du raisonnement, nous le réduirons à ses éléments essentiels, c'est-à-dire à une poulie parfaitement mobile, sur laquelle passe un fil très-fin, qui est tiré à chaque extrémité par le même poids m (Fig. 4). L'équilibre existe quand les deux poids sont au même niveau; et il existe encore quand l'un est plus haut et l'autre plus bas, comme il est facile de le vérifier par l'expérience. Maintenant, ajoutons d'un côté une petite masse que nous représenterons par n : il est clair que l'équilibre est troublé, que le poids n entraîne le poids sur lequel il repose, et qu'il le force à descendre, tandis qu'il force l'autre à monter.

Mais quel est le mouvement qui en résulte? Est-il le même que si le poids n tombait librement, ou bien est-il modifié par les poids opposés qui se meuvent avec lui?

Les deux masses primitives n'ayant de mouvement que celui que leur donne la masse n, il est évident que celle-ci ne peut leur en donner qu'à ses dépens, qu'elle perd tout ce qu'elle donne, et qu'ainsi elle tombe moins vite qu'elle ne tomberait si elle était seule. De plus, il est facile de trouver de combien sa chute est ralentie.

Soit g la vitesse qui serait due à la pesanteur après une seconde de temps; la masse n, si elle était libre, aurait donc au bout d'une seconde cette même vitesse g, et par conséquent une quantité de mouvement gn.

Soit x la vitesse inconnue que prennent en une seconde les deux masses m et la petite masse n en tombant ensemble; la quantité de mouvement du système sera $x\,(2m+n)$, puisque la masse qui se meut est d'une part m et de l'autre $m+n$, dont la somme fait $2m+n$. Or, dans une seconde, la masse n reçoit de la pesanteur la même quantité de mouvement, soit qu'elle tombe d'une chute libre, soit qu'elle tombe d'une chute retardée par d'autres masses. Donc,

$$x(2m+n)=gn, \quad \text{d'où} \quad x=g.\frac{n}{2m+n}.$$

C'est, dans la machine d'Atwood, la vitesse du corps qui tombe. Elle est toujours plus petite que g, et peut en être une aussi petite fraction qu'on voudra. Si l'on veut, par exemple, qu'elle en soit un centième, il suffit de poser

$$\frac{n}{2m+n}=\frac{1}{100}, \quad \text{d'où} \quad 100n=2m+n, \quad \text{et} \quad n=\frac{m}{49,5};$$

c'est-à-dire qu'à chaque instant la vitesse, dans la machine d'Atwood, est la centième partie de la vitesse due à la chute libre, quand la masse additionnelle est la 49,5 partie d'une des masses primitives. En prenant, par exemple, $n=10$ gr. et $m=495$ gr., la condition sera remplie.

Il y a un grand avantage à réduire ainsi la vitesse des corps qui tombent, puisque alors on peut négliger complétement la résistance de l'air, et mesurer les espaces parcourus avec beaucoup plus d'exactitude. Cette réduction de la vitesse est le vrai principe de la machine d'Atwood. Voici maintenant sa disposition :

1° Pour éviter le frottement, on fait poser chaque extrémité de l'axe de la poulie principale *ab* (Fig. 1 et 2) sur deux autres poulies plus petites 1, 2 et 3, 4, dont les axes terminés en pivot roulent dans des chapes d'acier ou d'agate (Fig. 1 *élévation*, et Fig. 2 *vue en dessus*).

2° Pour mesurer les espaces avec exactitude, on dispose près de la colonne une règle verticale et divisée *rr*, que la masse $m+n$ doit suivre dans sa chute, sans la toucher. Sur cette règle se meuvent deux curseurs : l'un a, en forme d'anneau, pour laisser passer la masse m et pour arrêter la masse n, que l'on fait un peu plus longue; l'autre c, en forme de plan, pour recevoir la

masse m et l'arrêter où l'on veut (*ces pièces sont vues détachées, à gauche de la figure* 1, *sous les n*os 1, 2, 3, 4).

3° Pour compter le temps pendant lequel le mobile s'est mû, on adapte près de la machine une horloge à secondes h, et on la fait communiquer à une détente particulière d qui soutient la masse $m+n$ vis-à-vis le sommet de la règle, où se trouve le *zéro* de sa division. A un instant donné, la détente part, le poids tombe, et l'horloge continue de marquer le temps qui s'écoule (Fig. 1 et 3).

On fait les expériences de la manière suivante : On place l'anneau de la règle à une hauteur telle, qu'il arrête la masse n après une seconde de chute depuis l'instant du départ. Pour cela, on l'élève et on l'abaisse peu à peu, jusqu'à ce que le bruit de la masse n, au moment où elle le frappe, coïncide juste avec le battement de l'horloge qui marque la fin de la seconde. Quand n est arrêtée, tout le mouvement ne s'arrête pas, car les masses m ont une *vitesse acquise*, en vertu de laquelle elles continuent à se mouvoir : seulement, la pesanteur n'agit plus pour changer leur mouvement ; n étant enlevée, la force accélératrice est enlevée, et le mouvement qui succède est un mouvement uniforme. Or, d'après ce que nous avons dit (33), la vitesse de ce mouvement uniforme est précisément celle du mouvement accéléré qui avait lieu à la fin de la première seconde, et, pour la trouver, il suffit de placer le curseur c de telle sorte que m vienne le frapper juste une seconde après que n est ôtée, c'est-à-dire deux secondes après le départ de n. Alors, la distance des deux curseurs a et c est l'espace que m a parcouru en une seconde en vertu du mouvement uniforme ; c'est donc la vitesse de ce mouvement et aussi la vitesse du mouvement accéléré. On fait une deuxième expérience en n'ôtant la masse n qu'après deux secondes ; on en fait une troisième en ne l'ôtant qu'après trois secondes, et l'on a ainsi la vitesse du mouvement accéléré après une, deux et trois secondes. On trouve exactement que ces vitesses sont entre elles comme 1, 2, 3 ; donc, elles croissent proportionnellement au temps ; donc le mouvement dont il s'agit est uniformément accéléré.

Ce résultat suffirait pour conclure que l'espace parcouru, en vertu du mouvement uniformément accéléré pendant un certain temps, est moitié de l'espace parcouru dans le même temps par le mouvement uniforme qui lui succède. Mais on le voit direc-

tement, car, dans chacune des expériences précédentes, la distance des curseurs est double de la distance de l'anneau au point de départ.

Pareillement, on pourrait en conclure par le calcul que les espaces sont comme les carrés des temps; mais il est facile d'imaginer comment on peut le démontrer aussi par le moyen de la machine.

Ces expériences s'accordent avec celles de Galilée, pour prouver que la pesanteur qui s'exerce à la surface de la terre est une force accélératrice constante. Déjà, la chute dans le vide a fait voir qu'elle s'exerce également sur toute espèce de corps.

Ainsi, toutes les molécules matérielles, quelle que soit leur forme ou leur nature, sont constamment soumises à l'action de cette force.

D'après cela, les lois du mouvement qu'elle imprime sont exprimées par les formules générales du mouvement uniformément accéléré (**34**),

$$v = gt,$$
$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles il reste à mettre pour g la valeur qui convient à la pesanteur. On se rappelle que g représente la vitesse que la force accélératrice imprime au mobile pendant l'unité de temps, et l'on se rappelle aussi que cette vitesse est double de l'espace que la force fait parcourir pendant la même unité; ainsi g est un espace ou une longueur. Nous indiquerons plus tard un moyen très-exact d'en trouver la mesure, par les oscillations du pendule, et nous verrons qu'en prenant la seconde pour unité de temps, la valeur de g est, à Paris,

$$g = 9^{m},8088.$$

Avec cette donnée on peut s'exercer à résoudre plusieurs problèmes sur le mouvement des corps pesants.

CHAPITRE III.

Du Centre de Gravité. — De l'Équilibre des Solides. — De la Balance. — Du Poids, de la Masse et de la Densité des Corps.

41. Un corps pesant, quelque grand ou quelque petit qu'il soit, peut être considéré comme un assemblage d'un nombre infini de points matériels, dont chacun est sollicité par la pesanteur.

Toutes ces forces, quoique en nombre infini, peuvent être remplacées par une force unique, appliquée en un certain point; c'est cette force, qui n'est autre chose que la somme ou la résultante de toutes les actions de la pesanteur, que l'on appelle le *poids* d'un corps, et c'est le point où elle est appliquée qu'on appelle son *centre de gravité*.

Cette définition suffit pour que l'on ne confonde pas la *pesanteur* avec le *poids*, puisque la pesanteur est la force élémentaire qui sollicite chacune des parcelles de la matière en général, tandis que le poids d'un corps est la somme de toutes les actions que la pesanteur exerce sur ce corps en particulier.

Il est très-important de savoir déterminer le poids des corps et leur centre de gravité, puisque alors on pourra substituer le poids, qui est une seule force, à toutes les forces élémentaires qui agissent sur un corps; et le centre de gravité, qui est un seul point, à l'ensemble des points qui le constituent; et qu'ainsi une masse pesante, quelles que soient sa grandeur et sa forme, pourra être considérée comme un seul point sollicité par une seule force.

42. Du Centre de Gravité. — Dans un corps pesant, qui n'a pas quelques centaines de mètres d'étendue, les actions que la pesanteur exerce sur chaque molécule peuvent être prises pour parallèles, puisqu'elles vont concourir au centre de la terre, et elles sont toutes égales, puisque ces molécules tombent également vite dans le vide; ainsi le *centre de gravité* n'est autre chose qu'un *centre de forces parallèles et égales*. De là résulte une propriété caractéristique du centre de gravité, c'est que ce

point est fixe dans l'intérieur des corps solides, et ne change pas, quelle que soit la position qu'on leur donne à l'égard de la pesanteur. Par exemple, le point *g* (Pl. 2, Fig. 5) étant le centre de gravité du triangle *abc* quand le point *c* est en haut, il sera encore le lieu du centre de gravité quand le point *c* sera en bas ou dans toute autre position qu'on pourrait lui donner, car le point d'application de la résultante des forces parallèles est indépendant de la direction de ces forces (**21**).

Pour qu'un corps pesant soit en équilibre, il n'y a qu'une seule condition essentielle à remplir : c'est que le centre de gravité soit soutenu. Par conséquent, si le centre de gravité est lui-même un point fixe, on pourra tourner le corps de toutes les manières possibles, il restera toujours en repos, parce qu'il sera toujours en équilibre. On en peut faire l'expérience avec un disque homogène, tournant autour d'un axe horizontal qui passe par le centre. Lorsqu'un corps est soutenu par un point fixe qui n'est pas le centre de gravité, l'équilibre est encore possible, mais il n'a plus lieu que dans deux positions seulement, savoir, quand le centre de gravité est dans la verticale du point fixe, soit au-dessus, soit au-dessous de ce point. On en peut faire l'expérience avec un disque homogène tournant autour d'un axe horizontal et excentrique.

C'est de cette considération que l'on tire un moyen expérimental de trouver le centre de gravité d'un corps. On l'attache avec un fil en un point *c* de sa surface (Fig. 6), on le suspend, et, quand il est en repos, on marque, avec autant d'exactitude qu'il est possible, le point *m* où le prolongement du fil viendrait percer la surface inférieure, le centre de gravité est nécessairement sur la ligne *cm*. Ensuite on recommence l'expérience, en attachant le corps par un autre point *a*, et en marquant de même le point *m'* correspondant; le centre de gravité est aussi dans la ligne *am'*. Donc, il se trouve à la rencontre des deux lignes *cm* et *am'*.

Pour des corps très-lourds, on pourrait faire l'expérience en sens contraire, en les tournant sur leurs arêtes ou en les posant sur des supports de petite étendue. Mais pour les corps homogènes qui ont des formes régulières, on détermine leur centre de gravité par des considérations géométriques assez simples.

Ligne droite. — Le centre de gravité est évidemment au milieu de la longueur.

Prismes et cylindres à bases parallèles. — Le centre de gravité est au milieu de l'axe (Fig. 12, 13 et 14).

Parallélogramme. — Le centre de gravité est à la rencontre des diagonales, car chaque diagonale coupe la figure en deux parties égales. Il en est de même pour un parallélogramme creux, comme un cadre.

Cercle. — Le centre de gravité est au centre du cercle; ce point est pareillement le centre de gravité de la circonférence et celui de l'anneau compris entre deux circonférences concentriques (Fig. 15).

Triangle. — On mène les lignes *de*, *fg*, etc., parallèlement à la base (Fig. 7), ensuite la ligne *am* qui coupe en deux parties égales cette base et toutes ses parallèles; on achève le parallélogramme *dbce*, *hkli*, etc., par des lignes parallèles à *am*. La ligne *am* passe par le centre de gravité de tous les parallélogrammes extérieurs, et aussi par les centres de gravité de tous les parallélogrammes intérieurs au triangle; et elle y passe, quelle que soit la grandeur que l'on donne à ces parallélogrammes. Or, comme ils sont, les uns circonscrits au triangle, les autres inscrits, et, comme à leur limite de petitesse ils finissent par se confondre avec lui, il faut bien aussi que le centre de gravité du triangle soit sur *am*; pareillement, il doit être sur *bm'* (Fig. 8); donc il est en *g* à leur rencontre; et il résulte des triangles semblables *abg* et *mgm'* que *mg* est la moitié de *ag*, ou que le point *g* est aux deux tiers de *am*, à partir du point *a*.

Polygones. — On les décompose en triangles (Fig. 9), dont on cherche les centres de gravité; ensuite, on regarde les forces appliquées aux centres de gravité des triangles comme étant proportionnelles à leurs surfaces, on en cherche la résultante par les règles ordinaires, et son point d'application est le centre de gravité.

Pyramide triangulaire. — On mène une ligne du sommet *s* (Fig. 10) au point *g*, centre de gravité de la base *abc*; et on démontre aisément, en faisant des tranches inscrites et circonscrites, comme pour les triangles, que le centre de gravité est sur cette ligne *sg*; qu'il est pareillement sur *ag'*, et qu'ainsi il est en *g''* à leur rencontre. Ensuite, on conclut, par la comparaison des triangles semblables, que ce point *g''* est aux trois quarts de *sg*, à partir du sommet. Une pyramide quelconque se

décompose en pyramides triangulaires, et on arrive à cette conséquence, que, dans tous les cas, le centre de gravité d'une pyramide est sur la ligne qui joint son sommet au centre de gravité de sa base, et qu'il est aux trois quarts de cette ligne, à partir du sommet.

Polyèdres. — On les décompose en pyramides, comme les polygones se décomposent en triangles.

Cône. — C'est comme une pyramide (Fig. 11).

Sphère. — Le centre de gravité est au centre de la sphère ; de même pour une surface sphérique ; de même pour une couche comprise entre deux sphères concentriques.

43. **De l'Équilibre.** — Nous avons déjà vu que la seule condition d'équilibre d'un corps pesant est que son centre de gravité soit soutenu ; mais cette condition se remplit de diverses manières, suivant que le corps est suspendu à des points fixes ou posé sur des appuis.

1° Supposons, par exemple, un disque homogène (Fig. 17) percé de trois trous égaux, *a*, *b*, *c*, et dont le centre de gravité soit au centre de figure : ce disque sera en équilibre dans toutes les positions autour d'un axe passant par le trou central *a*, et cet équilibre s'appelle *indifférent ;* si l'axe passe par le trou supérieur *b*, l'équilibre est *stable*, parce que le corps tend à y revenir quand on l'en écarte ; on voit en effet qu'en faisant un peu tourner le disque autour de cet axe, le centre de gravité se déplace à droite ou à gauche sur l'arc *mn*. Il n'est plus soutenu, puisqu'il n'est plus dans le plan vertical de l'axe de suspension, et il descend pour revenir, après une série d'oscillations, s'arrêter dans ce plan ; si l'axe passe par le trou inférieur *c*, le disque peut encore mathématiquement être en équilibre ; cela aura lieu si le centre de gravité se trouve exactement dans le plan vertical de l'axe ; mais c'est un équilibre *instable*, parce qu'au moment où le centre de gravité sort de ce plan, il s'en écarte de plus en plus, et décrit une demi-circonférence entière pour venir s'arrêter au-dessous de l'axe de suspension.

En généralisant ces résultats, on voit qu'un corps quelconque, suspendu par un axe, peut être en équilibre stable, instable ou indifférent, suivant que son centre de gravité est au-dessous de l'axe, au-dessus de l'axe ou dans l'axe lui-même.

2° Examinons ce qui arrive à un disque simplement posé sur un plan horizontal ou incliné, et supposons que ce disque, com-

posé, par exemple, de plomb et de bois, ait son centre de gravité sur la circonférence *abd* (Fig. 18) à une distance assez grande de son centre de figure. Il résulte de ce qui précède qu'il y aura seulement deux positions d'équilibre : l'une stable quand le centre de gravité sera en *a*, l'autre instable quand le centre de gravité sera en *b*. Si ce même disque est posé sur un plan incliné (Fig. 19), il y aura encore équilibre quand le centre de gravité se trouvera dans le plan vertical *pb* mené par l'arête *p* du contact, la stabilité correspond toujours au point le plus bas *a*, et l'instabilité au point le plus élevé *b*.

Dans ce dernier cas, si le disque est poussé un peu en avant ou à droite, il tournera en remontant le plan sur une longueur égale à l'arc *pgv*, et il sera alors dans sa position de stabilité.

Lorsque les corps reposent sur le sol par une base plus ou moins large, il est nécessaire, pour l'équilibre, que la verticale du centre de gravité tombe dans l'enceinte de cette base. On voit d'après cela que le cylindre oblique (Fig. 16) sera en équilibre s'il n'a qu'une longueur *ab*, et qu'il tombera si on le surmonte d'un cylindre pareil qui déplace le centre de gravité au point de le porter en dehors des verticales du contour de la base.

43 *bis*. **Aiguille magique.** — En composant des corps de formes variées avec des pièces différentes, les unes de matières lourdes, les autres de matières légères, on arrive à placer le centre de gravité en un point très-éloigné du point où il devrait être si les corps étaient homogènes. Alors l'équilibre, toujours soumis aux conditions générales, s'établit ici et se maintient dans les positions les plus inattendues, du moins pour ceux qui ne savent pas se rendre compte de l'effet que doit produire un grain de plomb ou une goutte de mercure pour déplacer le centre de gravité dans un corps léger et volumineux.

C'est ainsi que l'on fait des *sorciers* qui retombent toujours sur leurs pieds, des *magots* qui se balancent de mille manières surprenantes, des *danseurs* qui font des pirouettes sur le sommet d'une colonne, en s'inclinant presque horizontalement sans jamais tomber, des *culbuteurs* qui semblent d'eux-mêmes grimper des escaliers, etc., etc.

Sans m'arrêter à ces jeux, qui sont trop simples, je dirai quelques mots de l'aiguille magique, dont la disposition est moins facile à deviner.

L'aiguille magique a la singulière propriété de se mettre d'elle-même toujours à l'heure quand on l'applique sur un cadran vertical. Ainsi, la figure 21 représente une glace dans laquelle on a percé un trou de 2 ou 3 millimètres de diamètre qui sert de centre à un cadran d'horloge; l'aiguille magique porte un axe saillant d'un diamètre un peu moindre que le trou; on la met en place, et elle se tourne d'elle-même pour se mettre à l'heure, puis elle fait le tour du cadran comme une aiguille ordinaire, avec cette différence qu'elle est libre et que si on la dérange, elle revient à la position voulue.

La figure 21 fera comprendre le principe de ce mécanisme. Désignons par a l'axe de l'aiguille, par g son centre de gravité, qui doit être à une certaine distance de l'axe du côté de la pointe, par p son poids, par ϖ un poids additionnel destiné à déplacer le centre de gravité g. Supposons que du point b, pris sur le prolongement de ga, on décrive une circonférence de rayon bz, qu'ensuite, par deux de ses points z et z', on vienne appliquer successivement le poids additionnel ϖ; pour les deux positions de ϖ, le centre de gravité du système viendra tomber en deux points x et x', donnés par les proportions

$$\frac{p}{\varpi} = \frac{zx}{gx}; \quad \frac{p}{\varpi} = \frac{z'x'}{gx'}.$$

Si, de plus, le poids additionnel ϖ a été choisi de telle sorte que l'on ait

$$\frac{p}{\varpi} = \frac{ab}{ag}$$

on voit que l'on a en même temps zz', parallèle à xx', et bz', parallèle à ax', et par suite $ax' = ax$.

Ainsi, la circonférence décrite du point a, comme centre, avec ax pour rayon, doit passer par le point x'.

Or, le point z' ayant été pris arbitrairement sur la première circonférence, il en résulte que le centre de gravité du système doit se trouver sur la deuxième, et qu'il y occupe toujours le point correspondant à celui que le poids additionnel occupe sur la première. Si l'on a, par exemple, divisé celle-ci en douze parties égales, comme l'indique la figure, et que l'on applique le poids additionnel successivement sur chacune de ses divisions,

il faut, à chaque fois, que l'aiguille se tourne pour que le numéro correspondant du petit cercle qui marque le centre de gravité du système vienne se placer verticalement au-dessous de l'axe de rotation *a*. Ainsi, le poids additionnel est-il au nº 12, la pointe de l'aiguille se tourne en haut; est-il au nº 6, elle se tourne en bas; est-il au nº 3, elle se tourne horizontalement vers la droite, etc., etc.

Il est facile, à peu de frais, de vérifier ce principe par l'expérience.

Mais la véritable aiguille magique agissant d'elle-même, et servant d'horloge, est un peu plus compliquée; on devine maintenant qu'elle porte dans le cercle *bz* un mouvement d'horlogerie chargé de faire rouler le poids additionnel dans une rigole circulaire, dont la circonférence *zz'* représente l'axe.

44. Les conditions d'équilibre, telles qu'on les donne habituellement et telles que nous venons de les établir, ne sont réellement suffisantes que dans les spéculations de la théorie, car elles supposent à la matière une propriété dont elle ne jouit pas; elles supposent que tous les corps sont parfaitement rigides, c'est-à-dire qu'ils ne sont ni élastiques ni compressibles, et que leurs molécules ont, à l'égard l'une de l'autre, une immobilité absolue. En effet, concevons un long tube de verre mince, posé par son milieu sur un appui quelconque : son centre de gravité sera soutenu, et cependant l'équilibre n'aura pas lieu, car il fléchira en vertu de son élasticité; il fléchira d'autant plus que l'on chargera ses extrémités d'un poids plus considérable; il en est de même d'un arbre soutenu sur ses coussinets : il fléchit toujours plus ou moins, suivant son poids, son élasticité, sa ténacité, et suivant les pressions qu'il supporte. Ce qui est vrai des corps inorganiques l'est à plus forte raison des corps organisés, qui sont bien moins tenaces et bien plus élastiques. Une plante est soutenue, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans l'enceinte qui est déterminée par ses racines; mais cela n'empêche pas que les rameaux ne fléchissent par leur propre pesanteur, et que la tige elle-même ne puisse fléchir et se rompre par la même cause. Un éléphant est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans l'enceinte des quatre colonnes qui supportent sa masse : mais il faut, en outre, que les vertèbres et les côtes soient assez fortement articulées pour porter un tel poids, et que les muscles et la peau puissent résister à la pression qu'ils en éprouvent.

On comprend pareillement que les changements de forme qui résultent, soit de l'élasticité, soit de la compressibilité, soit des mouvements volontaires qui déplacent les membres et les organes, sont autant de causes qui font varier le centre de gravité. Quand un homme lève le bras, son centre de gravité change de place; quand un oiseau allonge le cou, son centre de gravité est très-sensiblement porté en avant. On voit (Fig. 22), aux points *m*, *r*, *n*, *v*, les quatre positions du centre de gravité d'un oiseau dans les quatre stations principales de la marche, du repos, de la nage et du vol.

45. De la Balance. — La balance ordinaire se compose d'un fléau *ab* (Pl. 3, Fig. 9), soutenu par son milieu *m*, et dont les bras *am* et *bm* sont destinés à porter les bassins *c*, *d*, très-mobiles autour de leurs points d'attache. Après avoir équilibré ces bassins, on met dans l'un d'eux le corps à peser, et dans l'autre des poids marqués, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi, c'est-à-dire jusqu'à ce que le fléau soit parfaitement horizontal. Alors, si la balance est juste, le poids du corps est exprimé par le nombre de grammes et fractions de gramme qu'il a fallu mettre dans l'autre bassin; mais si la balance n'est pas juste, si ses deux bras ne sont pas mathématiquement égaux, il est évident que le poids du corps n'est plus représenté par les grammes qui lui font équilibre dans l'autre bassin, car les poids sont entre eux en raison inverse de leurs bras de levier, ou des bras de la balance, et ils ne sont égaux que quand les bras sont égaux.

Comme il est à peu près impossible de faire une balance dont les bras soient parfaitement égaux, on a imaginé diverses méthodes pour remédier à cet inconvénient. La plus simple est la *méthode des doubles pesées* ou des *pesées par substitution*. Elle consiste à équilibrer le corps avec du plomb, du sable ou d'autres objets, puis à retirer le corps quand l'équilibre est établi, et à lui substituer les grammes et fractions de gramme qui sont nécessaires pour rétablir l'équilibre. Les poids marqués prenant ainsi la place du corps à peser, l'inégalité des bras ne peut plus avoir d'influence.

La balance ordinaire dont nous venons de parler peut servir lorsqu'on ne veut atteindre qu'à une approximation d'environ 1 décigramme.

Pour les pesées très-exactes, il faut employer une balance plus parfaite, qui trébuche aisément à 1 milligramme lorsqu'elle

est chargée de 1 kilogramme dans chaque bassin. Voici les principales conditions au moyen desquelles on arrive à ce résultat.

1° Le fléau *f* (Pl. 3, Fig. 2, 7, 8) est traversé par un couteau d'acier *a* (Fig. 2) dont le tranchant, aigu sans être vif, repose sur des plans *b*, d'acier ou d'agate; de cette manière, le contact du fléau sur les supports ne change pas, et il n'éprouve que le moindre frottement possible.

2° Les deux bassins ou plateaux *c* (Fig. 3 et 8) s'attachent au fléau au moyen du crochet *d* et de la griffe *g* qui va reposer sur le tranchant du couteau *h*. Tous ces points de contact sont à arêtes mousses et en acier; il en résulte que le centre de gravité de chaque bassin et des poids qu'il contient se place librement dans la verticale du tranchant du couteau *h*, et que la distance de ce tranchant au tranchant de la suspension reste invariable pendant les oscillations de la balance.

3° Le centre de gravité du fléau peut être élevé ou abaissé au moyen de l'écrou *l* (Fig. 1, 7, 8) qui se meut sur la vis *p*. Le poids de cet écrou et la longueur de la vis sont tellement combinés, qu'en donnant successivement à l'écrou les trois positions *i*, *k*, *l* (Fig. 7), le centre de gravité du fléau se trouve successivement aux trois points *m*, *n*, *o*. Dans le premier cas, l'équilibre est instable et la balance est folle, dans le deuxième cas, l'équilibre est indifférent; enfin, dans le troisième cas, l'équilibre est stable, et le fléau accomplit une série d'oscillations plus ou moins rapides, suivant que le centre de gravité est plus ou moins abaissé au-dessous du tranchant du couteau. On voit en même temps que si l'équilibre n'est pas rigoureusement établi, s'il manque par exemple 1 milligramme dans l'un des bassins, le fléau penchera du côté du poids le plus fort, et que pour la même différence de 2 milligrammes il penchera d'autant plus que le centre de gravité sera moins abaissé au-dessous du tranchant du couteau. Au moyen de l'écrou *l*, on peut donc à volonté augmenter ou diminuer la sensibilité de la balance. Pour apprécier d'une manière plus exacte, soit l'inclinaison du fléau, soit l'amplitude des oscillations, on y adapte une longue aiguille *r* (Fig. 2 et 8), qui se meut sur une division circulaire *s* (Fig. 8), dont le centre est à peu près sur le tranchant du couteau *a*.

4° Pour conserver le poli du couteau de suspension *a* et des plans sur lesquels il repose, on adapte à la balance un système de fourchettes *t* (Fig. 4, 8), qui viennent saisir le fléau par-des-

sous, et qui le maintiennent soulevé pendant que l'on change les poids des bassins; puis en laissant doucement redescendre les fourchettes, le couteau vient se reposer sur ses plans, et le fléau peut faire des oscillations plus ou moins grandes suivant que les fourchettes ont été plus ou moins abaissées. La figure 4 représente le moyen de régler la hauteur des fourchettes pour qu'elles prennent et quittent le fléau en même temps. La figure 1 représente la colonne mobile *u*, dont la partie supérieure est munie de deux bras *v* destinés à porter les fourchettes, tandis que la partie inférieure se termine par un galet reposant sur le plan incliné *x* (Fig. 1, 5, 6), ce plan incliné se meut autour du centre *y* au moyen de la manivelle *z* : quand on tire la manivelle en avant, le plan incliné soulève le galet, la colonne *u*, les bras *vv*, les fourchettes *t*, et par conséquent le fléau *f* : au contraire, quand on pousse la manivelle en arrière, le plan incliné recule, et le ressort à boudin qui enveloppe la colonne *u* ajoute son effet au poids du fléau pour forcer la colonne à descendre avec ses fourchettes, et pour amener le couteau du fléau reposer sur ses supports.

Les balances exécutées d'après ces principes ont une justesse et une sensibilité qui ne laissent rien à désirer.

46. Du Poids, de la Masse et de la Densité. — Le gramme, qui est l'unité de poids adoptée en France, est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée prise au maximum de densité. Si la longueur du centimètre se perdait, on pourrait la retrouver, puisqu'elle est la centième partie du mètre; et, si le mètre lui-même venait à se perdre, on pourrait le retrouver aussi, puisqu'il est la dix-millionième partie de l'arc méridien de Paris compris entre le pôle et l'équateur : il suffirait de recommencer la mesure de la terre. Enfin, si la terre elle-même venait à changer de forme ou de grandeur, alors le mètre serait changé; on ne pourrait plus en retrouver la longueur actuelle : mais en même temps tout serait changé pour nous; les jours et les nuits n'auraient plus les mêmes périodes, ni les saisons le même cours et la même durée; l'unité de poids serait elle-même altérée, et elle le serait encore si l'eau pouvait changer de composition, ou si la pesanteur pouvait changer d'action. Ainsi, tout est conditionnel dans nos principes les plus fondamentaux, et la science a fait tout ce qu'il lui est donné de faire quand elle a établi ses bases sur la stabilité du monde.

On dit communément que la *masse* d'un corps est la quantité de matière qui le compose; mais cette définition serait tout à fait illusoire, si nous n'avions pas quelque moyen de comparer les quantités de matière et d'établir leurs rapports.

C'est en vain que l'on chercherait quelque caractère extérieur pour juger de la quantité de matière qui est contenue dans un espace donné; on n'y arriverait jamais, s'il n'y avait dans la nature quelque force particulière qui remplît les conditions suivantes : 1° qui sollicitât également tous les atomes des corps, et 2° qui fût telle que l'on pût en obtenir la résultante. Or, la pesanteur est une force de cette espèce; elle agit également sur toutes les substances, puisque toutes, dans leur chute, prennent la même vitesse; et on peut connaître sa résultante sur un corps donné, puisque cette résultante est le poids du corps. C'est d'après cette vérité d'expérience qu'il est permis de conclure que *la masse ou la quantité de matière est proportionnelle au poids*. Sur quoi il faut remarquer qu'il y a deux manières d'évaluer le poids d'un corps. On peut l'évaluer au moyen de la balance, comme nous venons de l'indiquer; alors le poids est indépendant de l'intensité de la pesanteur. Par exemple, si une balance est en équilibre à Paris, ayant une certaine quantité de fer dans un de ses plateaux et dans l'autre des poids de cuivre de la valeur d'un kilogramme, elle serait encore en équilibre au sommet des Alpes, quoiqu'au sommet des Alpes la pesanteur fût moindre qu'à Paris. Cela est ainsi, parce que le fer, le cuivre et toutes les substances gagnent du poids ou en perdent dans le même rapport, quand la pesanteur augmente ou quand elle diminue : la même balance serait encore en équilibre si on la portait aux limites de l'atmosphère, ou à la surface de la lune, ou même jusqu'à la surface du soleil. Au contraire, si l'on voulait évaluer les poids au moyen d'un ressort gradué qui fléchît d'une certaine quantité, le volume de fer, qui à Paris marque un kilogramme, ferait bien moins fléchir le ressort au sommet des Alpes, et le ferait fléchir vingt-six ou vingt-sept fois davantage à la surface du soleil; son poids évalué de cette manière changerait donc avec la pesanteur, et cependant sa masse ne changerait pas. Le poids donné par la balance peut être appelé poids relatif; celui qui est donné par le ressort peut être appelé poids absolu : alors il est vrai de dire que *la masse d'un corps est proportionnelle à son poids relatif*,

ou bien qu'elle est proportionnelle à son poids absolu divisé par l'intensité de la pesanteur; ce qui donne

$$m = \frac{p}{g} \quad \text{ou} \quad p = gm,$$

m désignant la masse d'un corps, p, son poids, et g, comme à l'ordinaire, l'intensité de la pesanteur.

Il se pourrait qu'il y eût dans la nature des substances *impondérables*, sur lesquelles la pesanteur n'exerçât aucune espèce d'action; ces substances sans pesanteur seraient aussi sans poids, mais elles ne seraient pas sans masse. Seulement toute comparaison serait impossible entre elles et les masses pesantes, tant qu'on n'aurait pas découvert quelque force, ou instantanée ou constante, qui pût agir sur les substances des deux espèces. Une substance impondérable, qui serait agrégée à la matière pesante pour constituer les corps, deviendrait une cause capable de retarder les mouvements dus à la pesanteur; elle agirait comme les masses m qui se font équilibre dans la machine d'Atwood, car elle partagerait le mouvement imprimé par la gravité. De ce qu'on n'observe aucun retard de cette espèce, on n'en peut pas conclure qu'il n'y a dans les corps aucune substance impondérable, mais seulement que, s'il y en a, elles y sont ou en masses proportionnelles ou en masses très-petites à l'égard des masses pondérables, ou qu'elles n'y sont pas agrégées d'une manière permanente, mais que les corps pesants les quittent quand ils se déplacent.

Reprenons l'équation $p = gm$, et remarquons que dans un corps homogène le poids p étant évidemment proportionnel au volume v, on a aussi

$$p = \varpi v;$$

ϖ est alors le poids de l'unité de volume, ou le *poids spécifique* du corps; c'est ce que l'on appelle improprement la *pesanteur spécifique*. Un corps n'a pas de pesanteur spécifique, de pesanteur qui le caractérise, puisque la pesanteur est la même pour tous les corps; mais il a un poids spécifique, car le poids, sous un volume donné, change d'un corps à l'autre.

De même, dans un corps homogène, la masse étant évidemment proportionnelle au volume, on a

$$m = dv,$$

d est alors la masse de l'unité de volume : c'est ce que l'on est convenu d'appeler la *densité* des corps, parce qu'en effet les corps les plus denses sont ceux qui ont le plus de masse sous le même volume.

Les trois relations

$$p = mg, \quad p = \varpi v, \quad m = dv,$$

sont importantes : on en fait un continuel usage en physique et en mécanique, et il ne faut pas perdre de vue les définitions des six quantités p, m, v, g, ϖ et d, dont elles se composent.

Il en résulte :

1° Que dans le même lieu les masses de deux corps quelconques sont entre elles comme les poids de ces corps ; on aurait, en effet, pour le premier $p = mg$, pour le second $p' = m'g$; g étant le même ; ce qui donne

$$\frac{p}{p'} = \frac{m}{m'};$$

2° Que dans le même lieu les poids spécifiques sont proportionnels aux densités ; on aurait pour les poids spécifiques $p = \varpi v'$; et $p' = \varpi' v'$, pour les densités $m = dv$ et $m' = d'v'$; d'où il résulte

$$\frac{\varpi v}{\varpi' v'} = \frac{dv}{d'v'} \quad \text{ou} \quad \frac{\varpi}{\varpi'} = \frac{a}{d'}.$$

Or, comme on ne cherche en général que des rapports de poids spécifiques ou des rapports de densités, on peut prendre l'un de ces rapports pour l'autre.

Pour les diverses substances, le rapport des poids spécifiques ou des densités semble exiger deux déterminations, celle des poids et celle des volumes ; car on a

$$\frac{\varpi}{\varpi'} = \frac{p}{p'} \cdot \frac{v}{v'}, \quad \text{et, par conséquent,} \quad \frac{d}{d'} = \frac{p}{p'} \cdot \frac{v'}{v};$$

c'est-à-dire que le rapport des densités est égal au rapport *direct* des poids multiplié par le rapport *inverse* des volumes. Mais, en général, on dispose les expériences pour opérer sur des volumes égaux ou sur des poids égaux.

Dans le premier cas, à volume égal, les densités de deux corps sont proportionnelles à leurs poids.

Dans le deuxième cas, à poids égal, les densités de deux corps sont en raison inverse des volumes de ces corps.

On a coutume de rapporter toutes les densités à celle de l'eau que l'on prend pour unité; alors, quand on dit que la densité d'un corps est 2, 3, 4, etc., cela signifie qu'à volume égal il pèse 2 fois, 3 fois, etc., autant que l'eau; ou qu'à poids égal il a un volume qui est $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, etc., du volume de l'eau.

Lorsqu'on connaît la densité d' d'un corps par rapport à un autre corps quelconque dont la densité est prise pour unité, il est facile de trouver son poids spécifique, ou le poids de l'unité de volume; car en représentant ce poids par ϖ', et en représentant par ϖ celui du corps dont la densité est 1, on a

$$\frac{d'}{1} = \frac{\varpi'}{\varpi}, \quad \text{d'où} \quad \varpi' = \varpi \,.\, d'.$$

Ainsi, la densité du mercure étant 13,598 par rapport à l'eau, le poids de 1 centimètre cube de mercure sera $\varpi' = 13{,}598 \,.\, \varpi$. Mais le poids ϖ du centimètre cube d'eau est 1 gramme si l'on prend le gramme pour unité de poids, ou $0^k{,}001$ si l'on prend le kilogramme pour unité. On a donc

$$\varpi' = 13^{gr}{,}598 \quad \text{ou} \quad \varpi' = 0^k{,}013598;$$

l'unité que l'on choisit pour ϖ étant toujours celle qui sert pour ϖ'.

La densité de l'hydrogène étant 0,0691 par rapport à celle de l'air qui est prise pour unité; le poids ϖ' d'un mètre cube d'hydrogène sera

$$\varpi' = 0{,}0691 \,.\, \varpi;$$

ϖ étant le poids d'un mètre cube d'air. Or, le poids d'un mètre cube d'air est égal à $1^k{,}2991$, ce qui donne pour le poids ϖ' du mètre cube d'hydrogène

$$\varpi' = 0^k{,}0898.$$

Nous verrons liv. II, chap. II, comment se déterminent les densités des différents corps.

CHAPITRE IV.

Du Pendule.

47. Le pendule ordinaire se compose d'une boule pesante suspendue à l'extrémité d'un fil flexible (Pl. 3, Fig. 10). Ses propriétés les plus fondamentales sont : 1° de marquer la direction verticale ou celle de la pesanteur ; 2° de faire des oscillations planes quand on l'écarte de la verticale, et qu'on l'abandonne à lui-même sans lui donner aucune impulsion. En effet, si l'on met le pendule dans une position quelconque *fa*, et qu'on le laisse tomber librement, il descend jusqu'en *l*, dépasse ce point, remonte de l'autre côté jusqu'en *b*, en décrivant un arc *lb* égal à l'arc *la*, ensuite il tombe de nouveau, arrive en *l*, remonte en *a*, et continue ainsi son mouvement pendant très-longtemps. On peut remarquer que, quand le pendule descend, la vitesse va en augmentant jusqu'en *l*, et qu'au contraire, quand il remonte, elle va en décroissant depuis le point *l* jusqu'au point où il s'arrête.

L'angle *afl* s'appelle l'*angle d'écart*, ou simplement l'*écart*.

Le mouvement de *a* en *b* ou de *b* en *a* est ce qu'on appelle une *oscillation;* de *a* en *l*, une *demi-oscillation descendante*, et de *l* en *b*, une *demi-oscillation ascendante*.

L'*amplitude* de l'oscillation est l'arc *ab* mesuré en degrés, minutes et secondes.

La *durée* d'une oscillation est le temps que le pendule met à parcourir cet arc.

La première conséquence qui se présente après ces observations, c'est que le mouvement du pendule est le *mouvement perpétuel ;* car si, en partant de *a*, il remonte à une hauteur *b* qui soit la même, il faut aussi qu'en partant de *b* il revienne exactement en *a* ; et, ce qu'il a fait la première fois, il le fera la seconde, la troisième et ainsi de suite perpétuellement.

Cette conclusion serait de toute rigueur, si en effet la hauteur du point *b*, où il arrive, était exactement égale à la hauteur du point *a*, d'où il est parti ; mais les frottements du point

de suspension f, et la résistance de l'air que la boule doit pousser devant elle, empêchent que cette égalité ne soit absolue. La différence ne devient sensible qu'après un certain nombre d'oscillations, et, loin de s'étonner que le mouvement ne soit pas perpétuel, on s'étonne qu'il puisse se continuer pendant si longtemps; car un pendule peut, sans s'arrêter, faire des oscillations pendant des heures entières.

Le pendule est un des instruments les plus simples de la physique, et cependant il est un des plus curieux à étudier, parce qu'il sert à la mesure exacte du temps, à la détermination de la figure de la terre, et à résoudre l'une des questions les plus importantes sur la gravitation universelle de la matière.

48. **Lois des oscillations du pendule.** — 1° La durée des oscillations qui sont *très-petites* est indépendante de leur amplitude. On dit que ces oscillations sont *isochrones*, pour exprimer qu'elles se font toutes dans le même temps. Les oscillations de 4 ou 5 degrés d'amplitude ne sont plus des oscillations très-petites, elles commencent à avoir une durée sensiblement plus grande.

2° La durée des oscillations est tout à fait indépendante du poids de la boule et de la nature de sa substance.

3° Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs des pendules.

Ces lois se déduisent rigoureusement des principes de mécanique; mais, en physique, on les démontre approximativement par l'expérience.

La première loi exigerait trop de temps pour qu'on essayât de la démontrer dans un cours, puisqu'il faudrait compter plusieurs centaines d'oscillations : les unes au commencement, quand l'amplitude est de 4 ou 5 degrés; les autres un peu plus tard, quand elles sont réduites à 2 ou 3 degrés; et les dernières vers la fin du mouvement, quand elles ne sont plus sensibles à l'œil, et qu'il faut les observer avec une lunette. On s'étonne d'abord que le pendule mette presque autant de temps à parcourir un arc de $\frac{1}{10}$ de degré qu'à parcourir un arc de 10 degrés, qui est par conséquent cent fois plus grand; mais l'on en conçoit la raison en observant que, dans le deuxième cas, la pesanteur lui imprime beaucoup plus de vitesse, parce qu'elle agit plus obliquement et d'une manière plus efficace. Cette *loi de l'isochronisme* est une des premières découvertes de Galilée. On rapporte que, étant très-jeune encore, il vit par hasard,

dans l'église métropolitaine de Pise, les balancements d'une lampe suspendue à la voûte, et qu'il resta très-frappé des retours périodiques de ces mouvements et de l'égalité de leur durée. Il n'en fallut pas davantage pour éveiller son génie, et cette observation d'un enfant devint la source des plus grandes découvertes.

La seconde loi se démontre facilement :

On prend différentes boules de métal, d'ivoire ou d'autres substances; on en compose des pendules de même longueur, que l'on fait osciller ensemble, et l'on voit que tous ces pendules restent d'accord pendant très-longtemps.

Quand la pesanteur agit pour faire osciller un pendule, elle agit séparément sur chacun des atomes de matière qui composent la boule. Ainsi, un seul atome de fer, par exemple, suspendu à l'extrémité du fil, doit osciller avec la même vitesse que deux atomes pris ensemble, puisqu'ils ont leur force séparée, et que cette force a pour chacun d'eux la même intensité; il doit osciller comme le ferait une réunion quelconque d'atomes; et en effet, sans les résistances et les frottements, il oscillerait comme une grande boule de fer. De plus, la pesanteur agissant de la même manière sur toutes les substances, un atome de fer doit osciller comme un atome d'ivoire, d'or ou de platine; et par conséquent toutes les masses, quelle que soit leur nature, doivent osciller avec la même vitesse. Cette expérience est importante, puisqu'elle donne une autre preuve que la pesanteur agit de la même manière sur tous les corps. L'expérience que nous en avons déjà faite dans le tube vide d'air n'est qu'une expérience grossière, puisque la pesanteur n'agit que pendant quelques fractions de seconde, tandis qu'avec le pendule nous pouvons observer ses effets sur les différents corps pendant des heures entières. Ils ne tombent, il est vrai, que dans l'arc d'oscillation, qui se replie sur lui-même un grand nombre de fois; mais il est évident que, pour la conséquence qui nous occupe, c'est comme s'ils tombaient d'un mouvement rectiligne et progressif. C'est par des observations de cette espèce, mais qui exigeraient beaucoup de soins et de précision que l'on pourrait découvrir s'il existe en effet, dans l'intérieur des corps, quelque substance impondérable, agrégée d'une manière permanente à la matière pondérable, et ayant, par rapport à elle, une masse sensible à volume égal. On ne peut rien déduire des observations de

Mairan sur ce sujet; elles n'ont point été faites dans cette vue, et elles datent d'une époque où l'on aurait vainement cherché le degré de précision auquel on peut atteindre aujourd'hui.

La troisième loi se démontre avec des pendules de diverses longueurs. Si, par exemple, on prend trois pendules dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, alors les durées des oscillations doivent être comme les nombres simples 1, 2, 3; et, en effet, si l'on fait osciller de tels pendules, soit en les suspendant au-devant l'un de l'autre, soit en les ajustant par un double fil (Fig. 11), on compte facilement que celui dont la longueur est 1, comparé à celui dont la longueur est 4, fait deux oscillations pour une, et qu'il en fait trois pour une quand on les compare à celui dont la longueur est 9. Ce n'est que par des considérations mécaniques que l'on peut se rendre un compte exact de ce résultat important.

49. **De l'intensité de la Pesanteur, du Pendule simple, du Pendule composé.** — Les lois dont nous venons de parler sont tout à fait indépendantes de l'intensité de la pesanteur. Supposez que cette force devienne cent fois plus intense ou cent fois plus faible, les petites oscillations seraient encore isochrones entre elles, et leur durée conserverait encore le même rapport avec le poids des pendules et avec leurs longueurs. Mais, bien que ces lois ne changent pas avec l'intensité de la force, il y a cependant quelque chose qui change, c'est la durée absolue de chaque oscillation. Si la pesanteur cessait d'agir à un instant donné, les corps cesseraient de tomber, et les pendules cesseraient d'osciller, ou du moins les corps ne tomberaient plus qu'en vertu de leur vitesse acquise, et les pendules qui sont actuellement en mouvement décriraient des cercles entiers sans être rappelés dans la verticale, et sans être arrêtés par autre chose que par le frottement. Au contraire, si la pesanteur venait à doubler d'intensité, les corps tomberaient plus vite, et les pendules seraient plus prompts dans les retours de leurs battements.

Mais le vrai rapport qui existe entre la durée des oscillations, la longueur du pendule et l'intensité de la pesanteur, ne peut être démontré que par les lois de la mécanique, et nous devons nous borner à rapporter ici la formule qui sert à l'exprimer.

Soit l la longueur d'un pendule quelconque, exprimée en mètres;

Soit t la durée d'une oscillation de ce pendule, exprimée en secondes sexagésimales;

Soit π le rapport approché de la circonférence au diamètre, dont la valeur est, comme on sait, $\pi = 3,1415926$;

Enfin, soit g l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire le nombre de mètres qui exprime la vitesse d'un corps, après une seconde de chute libre.

On aura pour la formule du pendule:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad \text{d'où} \quad g = \frac{\pi^2 l}{t^2},$$

c'est-à-dire que l'intensité absolue de la pesanteur est égale au carré du rapport approché de la circonférence au diamètre, multiplié par la longueur du pendule qu'on observe, et divisé par le carré du temps d'une oscillation.

Pour avoir l'intensité de la pesanteur, il suffira donc de faire osciller un pendule, d'en mesurer la longueur pour avoir l, d'observer la durée d'une oscillation pour avoir t, et de faire ensuite les calculs indiqués.

Cette formule est celle qui convient au pendule *simple*. On appelle ainsi un pendule idéal, qu'il est facile de concevoir, mais qu'il est impossible de construire. Il se composerait d'un fil inextensible et sans pesanteur, à l'extrémité duquel serait fixée une seule molécule de matière pesante.

50. Tout pendule qui n'est pas simple, comme le précédent, s'appelle *pendule composé :* ainsi un fil inflexible et sans pesanteur, auquel seraient attachées seulement deux molécules pesantes, m et n (Fig. 12), formerait un pendule composé. Dans cet appareil la vitesse d'oscillation se *compose* en effet des vitesses d'oscillation que prendrait séparément chacune des petites masses, en oscillant librement. La molécule m, qui n'est qu'à la distance fm du point de suspension, tend à osciller plus vite que la molécule n, qui en est à la distance fn; mais, puisqu'elles sont liées l'une à l'autre, forcées de marcher ensemble et d'accomplir leur oscillation dans le même temps, la première est retardée par la seconde; et la seconde accélérée par la première; de là, une vitesse intermédiaire, qui est la vitesse du pendule composé. Dans tout corps qui oscille, il se fait une compensation analogue entre toutes les vitesses différentes que prendraient les diverses molécules, si chacune d'elles oscillait librement.

Pour faire mieux entendre cette vérité fondamentale, nous prendrons encore un exemple : *fp* (Fig. 13) représente un pendule ordinaire, tel à peu près que ceux qui servent de régulateurs aux horloges; *f* est le point fixe, *ft* est ce qu'on appelle la tige; et *l* la lentille. Le point *m*, et ceux qui sont comme lui très-voisins de l'axe de suspension, marcheraient très-vite, s'ils étaient seuls. Au contraire, le point extrême *n*, et ceux qui sont comme lui très-bas, ne pourraient marcher que très-lentement. Les premiers sont donc retardés par l'effort qu'ils font pour entraîner les derniers, et ceux-ci sont accélérés par l'impulsion qu'ils en reçoivent. Donc, entre le point *m* et le point *n*, il y a un certain point *c*, qui n'est, lui, ni retardé ni accéléré, et qui fait son oscillation exactement comme s'il était seul et librement suspendu à l'extrémité du fil *fc*; ce point remarquable est appelé le *centre d'oscillation*. Dans tout pendule composé, il se trouve nécessairement un ou plusieurs centres d'oscillation, et leur distance *commune* au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule*. Cette longueur est en effet égale à celle du pendule simple, qui oscillerait avec la même vitesse que le pendule composé. Le centre d'oscillation dépend de la forme du corps qui oscille, quand ce corps est homogène; et il dépend de sa forme et de la densité de ses parties, quand il est hétérogène. Un pendule tout en cuivre aurait, par exemple, son centre d'oscillation en *c* (Fig. 13) quand sa tige serait très-épaisse, et en *d*, si elle se réduisait à un fil. Un petit poids que l'on ajouterait vers l'extrémité inférieure *n* ferait descendre encore le centre d'oscillation, et il le ferait remonter si on l'ajoutait vers le haut. Aussi voit-on, dans quelques horloges, un *curseur* pesant, qui peut glisser le long de la tige du pendule, et que l'on fait descendre ou monter pour faire retarder ou avancer l'horloge; mais le plus souvent cet effet se produit par la lentille elle-même, qui peut être relevée ou rabaissée par un petit mouvement de vis.

Les oscillations d'un poids suspendu à un fil vertical autour duquel il tourne, et les oscillations du balancier qui règle le mouvement des montres (Fig. 14, 15), s'accomplissent aussi suivant les lois du pendule composé ; mais la force agissante est, dans le premier cas, l'élasticité de torsion du fil, et, dans le deuxième cas, l'élasticité du ressort spiral mis en jeu par les impulsions de la roue de rencontre; la figure 15 représente plus en grand la

roue d'échappement et les deux palettes de la verge du balancier, sur lesquelles elle agit tour à tour.

Puisque nous ne pouvons employer que des pendules composés, on voit, d'après ce qui précède, que, pour déterminer l'intensité de la pesanteur par les observations du pendule, il se présente deux grandes difficultés : premièrement, celle d'observer avec précision la durée d'une oscillation ; secondement, celle de déterminer avec exactitude la longueur du pendule que l'on fait osciller ; car ce n'est qu'après avoir trouvé ces deux éléments essentiels que le pendule composé peut être *ramené* au cas du pendule simple, et qu'il est permis d'employer la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, pour en tirer la valeur g de l'intensité de la pesanteur.

Borda est le premier physicien qui nous ait donné une méthode exacte pour mesurer le pendule : il avait le génie des recherches de cette espèce, car il avait le génie de la précision. Ses expériences furent faites, en 1790, à l'Observatoire de Paris, et l'on peut dire qu'avant cette époque il n'y avait pas un lieu de la terre où la force de la pesanteur fût connue. MM. Biot, Bouvard et Mathieu ont répété les mêmes expériences en 1808, d'après les procédés de Borda et avec des instruments analogues. En 1818, M. Arago et M. de Humboldt en ont fait encore une vérification par d'autres procédés. Toutes ces expériences confirment l'exactitude de celles de Borda, et il en résulte enfin que l'intensité de la pesanteur est, à Paris, telle qu'il l'avait trouvée, savoir, de $9^m,8088$. C'est-à-dire qu'un corps qui tombe dans le vide pendant une seconde, acquiert une telle vitesse que, si la pesanteur cessait d'agir sur lui, il parcourait $9^m,8088$ dans toutes les secondes suivantes. Ce qui peut s'exprimer encore en disant qu'un corps qui se meut dans le vide, en partant du repos, parcourt en $1''$ un espace qui est de $4^m,9044$, car nous avons vu que la vitesse qui a lieu après l'unité de temps est double de l'espace parcouru pendant cette unité.

On trouvera, dans le tableau qui termine ce chapitre, l'ensemble des observations du pendule qui ont été faites dans les diverses régions de la terre, et il sera facile d'en déduire l'intensité de la pesanteur à chaque station, au moyen de la formule

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2}.$$

Connaissant en effet la longueur l du pendule qui fait une oscillation en 1″ sexagésimale, il suffira de supposer $t=1$, de mettre pour l sa valeur réduite en mètres, et pour π sa valeur 3,1415926.

51. De la figure de la Terre. — On sait que les plus hautes montagnes ne sont que de très-petites éminences par rapport au globe de la terre : telles à peu près que seraient des grains de sable disséminés sur un globe d'un mètre de rayon ; il paraît que les plus grands bassins des mers ne sont que de petites cavités, analogues aux saillies des montagnes. Ainsi, prise dans son ensemble, la surface de la terre est sensiblement régulière, et peut être considérée comme telle dans les calculs. Les plus anciens astronomes avaient reconnu sa courbure, et comme, dans leurs idées, la sphère était la forme la plus parfaite, ils n'avaient pas douté que la terre ne fût une sphère très-exacte ; on peut même présumer, d'après quelques documents historiques, qu'ils avaient fait de grands efforts pour en mesurer les dimensions, et qu'enfin ils y étaient parvenus d'une manière assez approchée. Cependant la terre n'est point sphérique : elle est renflée à l'équateur et aplatie vers les pôles, et nous allons essayer d'indiquer d'une manière générale la cause de l'aplatissement et les moyens par lesquels on a pu en avoir la mesure.

Si la terre était solide dans toute sa masse, ou seulement dans toute la couche extérieure qui sert d'enveloppe aux parties centrales, elle pourrait avoir une forme quelconque, et n'être ni sphérique ni sphéroïdale : seulement, il y aurait un certain rapport entre sa forme et les périodes de ses mouvements. Au contraire, si la terre était toute fluide, elle aurait nécessairement la forme d'un sphéroïde, ou d'une sphère aplatie aux deux pôles ; car la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation qu'elle accomplit sans cesse sur son axe, repoussant le fluide de plus en plus, l'accumulerait vers les régions de l'équateur, où elle le soutiendrait à un niveau plus élevé. Le globe entier de la terre étant composé, en même temps, des substances solides qui forment les continents et les montagnes, et de la masse fluide qui remplit les bassins des mers, on voit qu'il y a deux questions à se proposer sur la figure de la terre, savoir : quelle est la forme générale de la surface solide des continents, et quelle est la forme de la surface des eaux. Pour celle-ci, il faut bien qu'elle soit renflée à l'équateur, car rien ne s'oppose à l'effet actuel de la force centri-

fuge; les eaux de l'Océan cèdent à son action, malgré les îles et les sinuosités des grandes côtes, à peu près comme elles feraient si elles avaient leur niveau élevé de plusieurs mille mètres au-dessus des sommets des montagnes.

Quant à la forme générale de la surface solide des continents, il résulte aussi, des observations qui ont été faites, qu'elle est elle-même aplatie comme la surface des eaux, ou à peu près, c'est-à-dire qu'elle offre la même courbure que si le globe entier de la terre, ayant été fluide autrefois, ne se fût consolidé qu'après avoir tourné sur lui-même, comme il tourne aujourd'hui, et après avoir reçu la forme qui résulte nécessairement de ce mouvement de rotation. Une preuve frappante de l'aplatissement de la surface continentale, c'est que les montagnes des régions polaires ne sont pas très-élevées au-dessus du niveau de la mer; et cependant, si la surface de la terre était sphérique, tandis que la surface des eaux est aplatie, on voit qu'à l'équateur les montagnes devraient être moins hautes qu'au pôle de toute la valeur de l'aplatissement, c'est-à-dire d'environ 20 000 mètres; tandis qu'il paraît au contraire que les montagnes de l'équateur restent encore plus élevées que celles du pôle.

Pour prendre une idée des principes sur lesquels repose la mesure directe et géodésique de l'aplatissement de la terre, il suffit de considérer deux points éloignés et liés entre eux par une chaîne de triangles qui permette de mesurer exactement leur distance. Nous prendrons pour exemple Dunkerque et Formentera, qui se trouvent sur le méridien de Paris; les verticales de ces deux points font entre elles un angle de 12° 22′ 14″. Ces deux lignes concourent au centre de la terre exactement, ou un peu plus près, ou un peu plus loin. Si, de leur point de rencontre, on décrit un arc de cercle passant par Dunkerque et par Formentera, c'est cet arc qui sera de 12° 22′ 14″. Or, de la chaîne des triangles on déduit que la distance de ces deux points, comptée sur cet arc de cercle, ou à très-peu près, est, en mètres, de 1374438,72. Donc, si 12° 22′ 14″ forment cette distance, un seul degré forme une longueur qui est très-facile à trouver: c'est cette longueur que l'on nomme un degré du méridien. Si la terre était sphérique, tous les degrés seraient égaux entre eux et vaudraient le même nombre de mètres, et réciproquement. Donc, au contraire, si l'on trouve que les degrés sont inégaux, on conclura que la terre n'est pas sphérique. On voit (Fig. 18) que, si elle est elliptique et

aplatie vers les pôles, les verticales de l'équateur, qui font entre elles un angle de 1°, vont se rencontrer plus tôt que les verticales des pôles qui font le même angle; ainsi, l'arc de 1°, compris entre les premières, a une moindre longueur, comme appartenant à un cercle d'un plus petit rayon, que l'arc de 1°, compris entre les verticales des pôles; d'où il suit que, *vice versa*, si on trouve les degrés de l'équateur plus petits que les degrés des pôles, on pourra conclure, avec la plus grande certitude, le fait de l'aplatissement.

Or, des arcs, dont chacun avait plusieurs degrés d'étendue, ont été mesurés sur divers méridiens et à plusieurs latitudes : au Pérou, par Bouguer et La Condamine; dans l'Inde, par Lambton; au cap de Bonne-Espérance, par Lacaille; en Pensylvanie, par Mason et Dixon; en Italie, par Lemaire et Boscowich; en France, par Delambre et Méchain; en Espagne, sur les côtes de la Méditerranée, par Arago et Biot; en Angleterre, près de Greenwich, par Roy, Delambre et Méchain; en Suède, par Melanderhielm. De l'ensemble de ces mesures, il résulte deux conséquences : premièrement, que la terre n'est pas sphérique, puisque les degrés sont inégaux à diverses latitudes; et, secondement, que la terre est en effet aplatie vers les pôles, puisque les longueurs des degrés vont en croissant à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. En combinant ces mesures par diverses considérations géométriques, on en peut déduire les longueurs du rayon de la terre pour des latitudes diverses. On trouve alors les résultats suivants :

Rayon de l'équateur...	6376984 mètres.	ou	1434,8 lieues.
Rayon du pôle........	6356324		1430,1
Différence............	20660		4,7

L'*aplatissement* est la différence entre les rayons de l'équateur et du pôle divisée par le rayon de l'équateur; il est donc, d'après ces mesures, de $\frac{1}{308,65}$. Le *rayon moyen* de la terre est celui qui correspond à la latitude de 45°; on le trouve de 6366745 mètres = 1432,4 lieues. En combinant d'autres mesures, on trouve un autre rayon qui diffère un peu du précédent, et qui est de 6366194. La différence est insensible dans la plupart des applications, puisque 500 mètres ne sont que la dixième partie de la hauteur du Mont-Blanc.

52. Les observations du pendule peuvent servir aussi à dé-

terminer l'aplatissement de la terre; mais pour cela il faut avoir recours à une formule de mécanique exprimant la relation qui existe entre les intensités de la pesanteur sur deux points donnés du globe et les distances comparées de ces points au centre de la terre. C'est au moyen de cette formule que nous avons pu discuter l'ensemble des observations rapportées dans le tableau qui termine ce chapitre; mais, sans entrer ici dans les détails de cette discussion, nous nous bornerons à indiquer les principales conséquences qui en résultent, savoir : 1° que la nature du sol sur lequel on fait les observations a une influence sensible sur les oscillations du pendule; 2° qu'elle a par conséquent une influence plus ou moins marquée sur l'équilibre et sur le nivellement des eaux; 3° enfin, que par ces causes la surface de la mer a très-probablement des inégalités plus ou moins grandes, des éminences et des affaissements, qui ne l'empêchent pas d'être aplatie dans sa direction générale, à peu près comme l'indique la théorie, mais qui l'empêchent d'être une surface géométrique et exactement pareille à celle d'un ellipsoïde de révolution. Ainsi, quelles que soient les causes qui aient agi, à l'origine du monde, et quelles que soient celles qui aient pu se développer dans les catastrophes qui ont suivi, il arrive, comme on pouvait s'y attendre, que dans le sein de la terre toutes les matières ont été confondues, et que, plus pesantes ou plus légères, elles sont à peu près uniformément réparties dans toute l'étendue de chacune des couches. Il fallait qu'il en fût ainsi pour la régularité des mouvements et pour l'ordre des saisons, car les phénomènes se passeraient d'une tout autre manière, si l'un des hémisphères était, par exemple, léger comme du liége, et l'autre lourd comme du plomb. Cependant cette homogénéité générale n'empêche pas qu'il ne se rencontre, dans le globe de la terre, quelque hétérogénéité locale qui ait déformé sa surface, et qui ait produit, de distance en distance, quelque dépression ou quelque renflement.

53. Déviation du fil à plomb par l'attraction des montagnes. — Toutes les portions de la matière étant attirées l'une vers l'autre, on ne voit pas d'abord pourquoi de grandes masses, telles que des montagnes, n'exercent pas d'action sensible sur les corps qui les environnent; pourquoi, par exemple, quand on laisse tomber une pierre du haut d'un sommet élevé, cette pierre, en tombant, ne se dirige pas vers le centre de la montagne qui est très-près, plutôt que vers le centre de la terre qui est très-

loin. On peut même s'étonner que les murs d'un édifice ne produisent pas cet effet, et que, dans un appartement, un corps qui est suspendu en haut ne tombe pas sur le plafond plutôt que de tomber sur le plancher : à peu près comme aux antipodes les corps tombent en remontant vers nous. Mais, dès qu'on prend garde que la plus grosse montagne n'est qu'un grain de sable quand on la compare à la terre, on ne s'étonne plus que les montagnes ordinaires ne puissent pas attirer à elles les corps que la terre attire elle-même. L'effet qu'elles pourraient produire serait tout au plus de les dévier un peu dans leur chute. Réciproquement, si elles peuvent produire quelques déviations, on pourra être assuré que la pesantenr est, comme nous l'avons dit, une force universelle qui agit sur toute la matière, et qu'il n'y a ni tourbillon autour de la terre, ni vertu particulière vers son centre, par quoi les corps soient poussés ou sympathiquement précipités.

Bouguer est le premier qui eut l'idée de chercher, dans l'attraction des montagnes, une preuve de l'attraction universelle de la matière : si elles agissent, elles doivent dévier le fil à plomb. Mais comment reconnaître si le fil à plomb est dévié ? La même cause qui changerait sa direction changerait aussi celle de la surface des eaux tranquilles, à laquelle on la rapporte, et dès lors on ne pourrait plus juger ni de l'un ni de l'autre changement : aussi faut-il avoir recours aux étoiles : c'est encore dans le ciel qu'il faut chercher une direction fixe pour les expériences de cette nature. C'est sur les flancs du Chimboraço, qui est une des plus grandes montagnes de la terre, que Bouguer fit son expérience. Il y rencontra des obstacles infinis, à cause de l'âpreté des lieux et des tempêtes terribles qu'il eut à essuyer dans ces hautes régions. Cependant il accomplit son dessein et trouva dans le fil à plomb une déviation de 7″ ou 8″. Ces montagnes volcaniques ont sans doute d'immenses cavités qui réduisent de beaucoup l'énergie de leur action.

Depuis Bouguer, on a répété les expériences en divers lieux : Maskeline, en 1772, les a surtout répétées avec de grandes précautions, au pied des monts Shéhalliens, en Écosse, où il a trouvé une déviation de 54″. Il en résulte que certainement les montagnes agissent sur le fil à plomb, et qu'elles le dévient d'une quantité sensible, qui dépend de leur volume et de la nature des substances qui les composent. Maskeline avait fait ces expériences

pour en déduire le rapport de la masse de la terre à celle de la montagne, et par suite, la densité de la terre elle-même; il trouva de cette manière que la densité de la terre, prise dans son ensemble, est 4,56, ou à peu près quatre fois et demie la densité de l'eau. C'est, je crois, la première notion que l'on ait eue sur la nature des substances qui composent les couches centrales du globe.

En 1824, M. Carlini a fait, au sommet du Mont-Cenis, des observations d'une autre espèce, qui l'ont conduit à peu près au même résultat.

51. Enfin, nous devons à Cavendish une autre détermination de la densité moyenne de la terre. Son appareil paraît être le plus exact que l'on puisse employer à cette recherche. La première idée de sa construction est due à Michell, de la Société royale de Londres : Michell n'ayant pas eu le temps d'achever ses expériences, et voyant sa fin approcher, légua son appareil à l'honorable *Francis-John-Hyde Wollaston*, professeur à Cambridge; et celui-ci, à son tour, en fit don à Cavendish, qui était déjà compté parmi les premiers physiciens de l'Angleterre. Voici l'idée principale sur laquelle repose ce procédé : si l'on avait une grande boule de métal de 2 ou 3 mètres de rayon, il est clair qu'elle ne pourrait pas dévier le fil à plomb, puisque les montagnes ne le dévient que de quelques secondes; mais, si, au lieu d'un fil vertical sur lequel agit la pesanteur, on lui présentait au niveau de son centre un levier horizontal, bien équilibré et parfaitement mobile, il est clair qu'elle devrait l'attirer à elle et le faire tourner, puisque la pesanteur serait alors sans effet pour contrarier son action. Le levier horizontal serait donc une espèce de pendule qui oscillerait par l'attraction de la boule, comme le pendule ordinaire oscille par l'action de la terre. Si même, au lieu d'une boule, on en mettait deux, agissant chacune sur l'une des extrémités du levier, on voit que l'effet serait doublé; ainsi, par ce moyen, en prenant des boules assez grosses et des leviers assez mobiles, on peut sans doute rendre sensible l'action de la matière sur la matière, et produire en petit, autour de ces sphères de métal, ce qui se produit en grand autour du globe de la terre.

L'appareil de Cavendish est représenté, planche 3, dans les figures 16 et 17. La figure 17 en représente la projection horizontale : *u* et *v* sont les deux sphères de métal; elles étaient de plomb, et pesaient chacune 157^{k},925 : *abcd* représente la section

d'une caisse dans laquelle on avait enfermé le levier mobi pour le garantir complétement de toutes les agitations de l'ai s et s' sont deux petites balles suspendues aux deux extrémit du levier mobile et parfaitement en équilibre.

La figure 16 est une coupe verticale ; les mêmes lettres d signent les mêmes choses : on voit ici comment les deux p tites balles sont suspendues par un fil d'argent qui travet les extrémités du levier ; ce fil vient en n s'attacher au vertical ff' dont la ténacité est assez grande pour porter fléau et les balles s et s', et dont la torsion est la seule for qui s'oppose aux oscillations : les deux masses u et v sont elle mêmes suspendues par des tiges de fer, et peuvent tourner a tour de la caisse ; elles passent successivement, des positio u et v figurées en lignes pleines (Fig. 17), aux positions u' et figurées en lignes ponctuées ; elles y sont conduites par une m nœuvre qui s'exécute du dehors : enfin, tout l'appareil est e fermé dans une chambre sans portes et sans fenêtres ; il n'e éclairé que par une petite ouverture, au moyen d'une lampe placée en dehors des murs pour ne pas échauffer l'air intérieu et c'est avec la lunette ll' que l'on observe les mouvements q se produisent.

Tout étant en repos et les masses u et v étant dans la situati où elles n'agissent pas, c'est-à-dire dans la situation perpendic laire au levier mobile, on les fait tourner pour les mettre da la situation de la figure 17 : alors le levier se met à tourner, l petites balles s et s' sont attirées chacune vers la boule corre pondante, et les oscillations commencent. C'est une preuve bie irrévocable que la matière attire la matière, et que les petit balles s et s' tendent à tomber sur les grandes sphères de plon par la même puissance qui les fait tomber sur la terre, et qu s'il y a une différenee, elle provient seulement de la différen des masses. Ce fait fondamental une fois prouvé, il ne reste pl qu'à observer la durée des oscillations des petites balles, la lon gueur du levier à l'extrémité duquel elles oscillent, et leur dis tance au centre des grandes sphères u et v, qui peuvent êtr considérées comme les centres d'attraction. Ensuite, après avoi corrigé les résultats des effets de la torsion du fil de suspension l'on arrive à connaître l'effet d'une sphère de plomb du poid de $157^k,925$, pour faire osciller un pendule simple d'une lon gueur connue et placé à une distance connue de son centre. La

NS

LONGU
DU PER
agésim
ensemb
s observ

(8

mm.
993,9

994,8
994,5
994,0
993,9
993,6
993,5
993,5
993,0

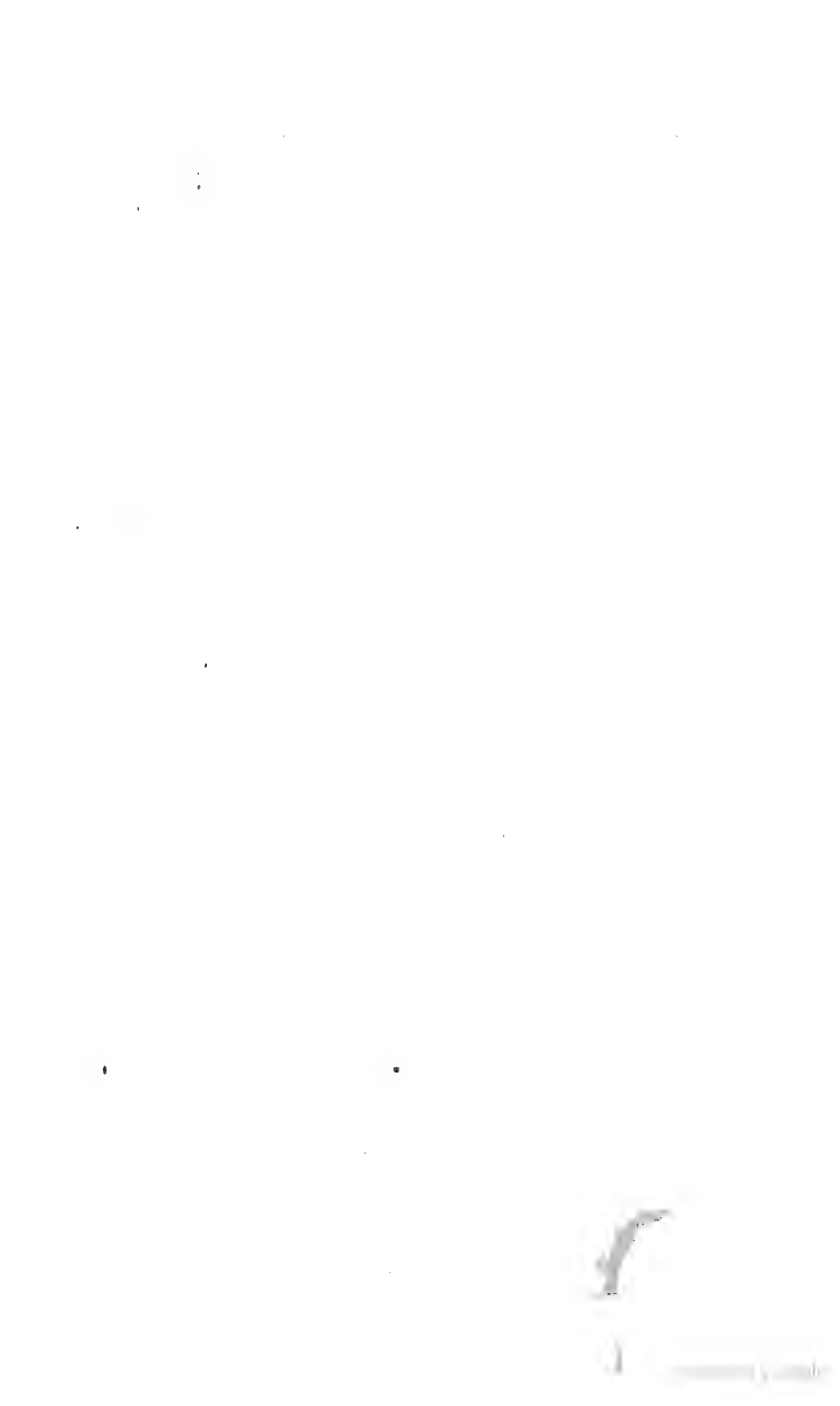
994,8
994,6
994,5
994,2
994,1
994,1
994,

993,
991,
991,
991,
991,
991,
992

d'une
pour l
s et *s'*
du lev

La
signen
tites l
les ex
vertica
fléau
qui s'o
même
tour d
u et *v*
figurée
nœuvr
fermé
éclairé
placée
et c'est
se proc

Tout
où elle
laire a
la situa
petites
pondan
irrévoc
balles *s*
par la
s'il y a
des ma
qu'à ob
gueur
tance a
considé
corrigé
l'on ar
de 15
gue



question étant amenée à ce point, il n'y a plus que des proportions à faire pour avoir la masse de la terre comparée à la masse du globe de plomb ; car ces masses sont entre elles comme les longueurs des pendules simples qui battent la seconde, étant placés à une même distance de leur centre. Dans cette proportion, tout est connu, excepté la masse de la terre, que l'on peut par conséquent en déduire ; on connaît d'ailleurs son volume par les mesures de l'arc du méridien, et, en divisant la masse par le volume, on obtient enfin sa densité moyenne. Pour dernier résultat de ces belles expériences, Cavendish trouva que la densité moyenne de la terre est de 5,48, nombre confirmé par des expériences récentes qui donnent 5,67 (*Soc. astr. de Londres*, t. XIV).

Connaissant la densité de la terre et son volume, il est facile de trouver combien elle pèse de kilogrammes, ou plutôt combien de kilogrammes on trouverait si l'on pouvait successivement prendre par petits fragments, d'un mètre cube par exemple, toutes les substances qui la composent pour les peser dans une balance, à Londres ou à Paris, et si l'on pouvait les remettre en place après les avoir pesées ; car, d'après ce que nous venons de voir sur l'attraction générale de la matière, nous pouvons être sûrs, quand nous faisons une pesée, que toutes les molécules du globe contribuent à faire pencher la balance.

Par les observations et par les calculs astronomiques, on évalue les masses des planètes et celle du soleil au moyen de la masse de la terre, d'où il suit qu'avec le poids de la terre nous pouvons trouver le poids de toutes les planètes.

Ainsi le petit appareil de Cavendish est une balance dans laquelle on peut peser le monde.

CHAPITRE V.

De l'Hydrostatique.

55. L'objet de l'hydrostatique est de déterminer les conditions d'équilibre des liquides, et les pressions qu'ils exercent sur les parois des vases qui les contiennent.

Les propriétés des liquides dépendent de deux forces : de la pesanteur qui agit sur eux comme sur tous les corps, et de l'attraction moléculaire qui agit sur eux d'une manière déterminée pour les constituer à l'état liquide. Nous pouvons distinguer par la pensée ce qui appartient à chacune de ces forces, car nous pouvons imaginer une masse d'eau qui cesse un moment d'être pesante, sans pour cela cesser d'être liquide : une telle masse ne pourrait plus ni tomber quand on l'abandonne, ni couler quand on la verse : et il est évident qu'elle n'aurait plus besoin, pour être en repos, ni d'être soutenue sur le sol, ni d'être contenue dans un vase. Dans cet état, elle pourrait encore recevoir et transmettre des pressions, conformément au principe général que nous allons examiner.

56. Principe d'égalité de pression. — Les liquides sont soumis au principe d'égalité de pression, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de transmettre, dans tous les sens et également, les pressions qu'on exerce à leur surface.

Ce principe est un axiome de physique; mais, s'il n'est pas nécessaire de le démontrer, il est au moins nécessaire de le faire comprendre : *abcd* (Pl. 4, Fig. 1) est un vase qui contient un liquide supposé sans pesanteur; *p* est un piston solide qui en couvre exactement toute la surface. Si le piston est aussi sans pesanteur, et s'il n'est chargé d'aucun poids, il est clair que le liquide n'éprouve aucune pression, et que l'on pourrait percer le vase sans qu'il s'écoulât : mais, dès qu'on pose sur le piston un poids de 100 kilogrammes, par exemple, à l'instant il fait effort pour descendre, et descendrait en effet si le liquide ne s'y opposait pas. Que le liquide soit compressible ou qu'il ne le soit pas du tout, le résultat est le même : il faut de toute nécessité qu'il

s'anéantisse ou qu'il porte les 100 kilogrammes. La couche supérieure x, qui touche au piston ou qui le soutient, en supporte donc tout le poids, et, pressée comme elle est, elle tomberait nécessairement si elle n'était pas soutenue par la couche y, qui est au-dessous d'elle ; elle presse sur cette couche autant qu'elle est elle-même pressée par le piston. De même, la couche y presse sur la suivante z, et ainsi de suite, la pression se communiquant de proche en proche jusqu'au fond du vase qui est lui-même pressé comme si le piston reposait immédiatement sur lui. Puisque c'est toute la surface du fond qui porte cette pression de 100 kilogrammes, il est visible que la moitié de la surface ne porte pour sa part que 50 kilogrammes, et que la centième partie de sa surface ne porte que la centième partie de la pression totale, c'est-à-dire un seul kilogramme. Ainsi :

1° La pression se transmet de haut en bas sur les surfaces horizontales, sans rien perdre de sa force ;

2° Elle est égale en chaque point ;

3° Elle est proportionnelle à l'étendue de la surface que l'on considère.

Sur les faces latérales le même phénomène a lieu : car, si en un point quelconque on faisait une ouverture, le liquide jaillirait, et, si l'on découpait une partie de la surface, elle serait poussée dehors ; enfin, si la portion que l'on découpe était égale à toute la largeur du piston, il ne faudrait pas moins de 100 kilogrammes pour la tenir en place ; et, si elle n'avait qu'une étendue cent fois moindre, il ne faudrait qu'un effort d'un kilogramme. Si le piston lui-même était percé d'un trou, le liquide jaillirait de bas en haut, ce qui prouve que sa paroi est elle-même pressée comme le sont toutes les autres. Ainsi, les liquides transmettent dans tous les sens et également, les pressions qu'on exerce à leur surface.

Après avoir compris ce principe pour des liquides sans pesanteur, il est facile de voir qu'il s'applique sans réserve aux liquides pesants, mais qu'alors il y a des pressions qui s'exercent sur chaque molécule et qui résultent de la pesanteur qui lui est propre.

57. **De l'équilibre des liquides pesants.** — Il y a deux conditions pour l'équilibre des liquides : il faut, premièrement, que les molécules supérieures et libres forment une surface perpendiculaire à la force qui les sollicite ; et, secondement, qu'une

molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens des pressions égales et contraires.

Première condition d'équilibre. — Supposons que la surface ne soit pas perpendiculaire à la force qui sollicite les molécules liquides, qu'elle soit, par exemple, dans la direction *abcde*, tandis que la force est dirigée suivant les verticales *vv* (Fig. 2) : alors, une petite couche horizontale, telle que *bd*, serait pressée de tout le poids des molécules qui sont au-dessus d'elle ; cette pression, comme nous venons de le voir, se transmettrait latéralement et la molécule *b*, poussée par cette pression latérale, serait poussée dehors, puisqu'il n'y a rien qui la retienne ; elle sortirait donc ; une autre viendrait, qui prendrait sa place, et qui serait poussée à son tour, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la courbure *bcd* se fût affaissée et fût devenue tout à fait horizontale. Il en arriverait de même de toute portion de liquide qui serait *au-dessus* d'un autre point quelconque de la surface, et l'équilibre ne peut avoir lieu que quand les molécules libres ne peuvent plus tomber, c'est-à-dire quand elles sont toutes rangées sur une même surface perpendiculaire à la force.

En appliquant ce principe à la surface de la mer, supposée parfaitement calme, il nous sera facile de prendre une idée de sa courbure et des causes qui la déterminent. Si toutes les directions de la pesanteur concouraient exactement au centre de la terre, et si cette force était la seule qui sollicitât les molécules liquides, il faudrait que dans tous les bassins de toutes les mers la surface libre des eaux prît la forme sphérique, car il n'y a que cette surface qui soit perpendiculaire à tous les rayons qui concourent en un point. Il faudrait de plus que toutes les plages fussent à la même distance du centre de la terre, car sans cela elles ne seraient pas au même niveau, et l'eau des plus élevées tomberait sur les plus basses.

C'est cette condition nécessaire à l'équilibre des masses fluides qui explique ce que nous avons annoncé dans le chapitre premier sur la direction de la pesanteur ; il faut bien que cette force soit perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, puisque c'est elle-même qui oblige les eaux à se ranger dans cette direction.

Quand les molécules liquides sont sollicitées par quelque autre force que par la pesanteur terrestre, on conçoit que pour l'équilibre elles ne doivent plus former une surface perpendiculaire à

la pesanteur seulement, mais une surface perpendiculaire à la résultante de la pesanteur et de toutes les autres forces qui agissent avec elle. Ainsi, la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation de la terre, se combinant sans cesse avec la pesanteur pour solliciter tous les corps, il faut que la surface des eaux s'arrange pour être perpendiculaire à la résultante de ces deux forces, et voilà pourquoi la surface de la mer est aplatie vers les pôles. Au pied des grandes montagnes, dont la masse est capable de dévier le fil à plomb, la surface des eaux est aussi déviée de sa forme régulière; elle se soulève et s'incline sur la véritable verticale, pour se mettre perpendiculaire à la résultante des actions de la terre et de la montagne. De même encore, quand la lune et le soleil passent au-dessus ou au-dessous de l'horizon de la mer, la force attractive que leurs masses exercent sur les eaux se combine avec la pesanteur pour produire une résultante qui n'est plus verticale; et c'est ainsi que la surface mobile de l'Océan, cherchant un équilibre qu'elle ne saurait trouver, à cause du mouvement de rotation de ces astres, se soulève et se déprime tour à tour, et accomplit enfin les oscillations périodiques du flux et du reflux.

Il se présente dans la nature beaucoup d'autres phénomènes qui semblent n'avoir aucun rapport avec les marées, et qui dépendent cependant d'un principe analogue : on sait, par exemple, que dans un verre ordinaire la surface de l'eau n'est pas plane dans toute son étendue, mais qu'elle se relève près des bords, comme le représente la figure 3 : au contraire, la surface du mercure se déprime au contact des parois, et semble craindre de les toucher (Fig. 4). C'est que la pesanteur n'est pas alors la seule force qui agisse sur les liquides; avec elle il y a deux autres forces : la force attractive que leurs molécules propres exercent l'une sur l'autre, et la force attractive qu'elles exercent sur la matière du vase. C'est à la résultante de ces trois forces que la surface liquide doit être perpendiculaire, et c'est surtout du rapport d'énergie qui existe entre les deux dernières que dépend l'inflexion qu'elle éprouve au-dessus ou au-dessous de la ligne de niveau. Nous verrons sortir de ce principe toute cette classe de phénomènes qui sont connus sous le nom de *phénomènes capillaires*, et dont nous devons traiter dans un des livres suivants.

Deuxième condition d'équilibre. — La deuxième condition

d'équilibre est évidente d'elle-même, car les molécules qui sont dans l'intérieur de la masse liquide reçoivent les pressions de toutes les molécules qui sont placées au-dessus d'elles, et, en vertu du principe d'égalité de pression, elles tendent à transmettre ces pressions dans tous les sens : or, si, dans deux directions opposées, les pressions que supporte une molécule n'étaient pas égales et contraires, cette molécule serait entraînée par la plus forte pression, et par conséquent la masse liquide ne serait pas en équilibre.

58. **Pressions.** — Lorsque les masses liquides sont en équilibre, elles exercent sur elles-mêmes, et sur tous les corps solides qu'elles touchent, des pressions plus ou moins considérables, dont nous allons déterminer la valeur, en examinant successivement les pressions de haut en bas et de bas en haut, qui sont exercées sur les surfaces horizontales, puis les pressions exercées sur les surfaces obliques.

1° La pression de haut en bas qu'un liquide exerce sur le fond du vase qui le contient, est tout à fait indépendante de la forme du vase, et elle est toujours égale au poids d'une colonne de ce liquide ayant pour base le fond du vase, et pour hauteur la hauteur du niveau.

La première partie de cette proposition se démontre aisément au moyen de l'appareil de M. de Haldat (Fig. 9). Cet appareil se compose d'un tube recourbé *abc*, fixé dans une caisse *y*, et ajusté pour recevoir en *a* des vases de différentes formes, tels que *d*, *e*, *f*, *g* (Fig. 9, 10, 11, 12). On commence par mettre du mercure dans le tube *abc*, et, au moyen du curseur *p*, on note sur la branche *c* la hauteur *z* à laquelle il s'arrête ; alors on visse sur l'extrémité *a* le vase cylindrique *d* ; on y verse de l'eau jusqu'à une certaine hauteur *h*, et l'on observe la hauteur *z'*, à laquelle le mercure s'élève dans la branche *c*. L'élévation *zz'* de la colonne de mercure résulte évidemment de la pression que l'eau contenue dans le vase *d* exerce sur la surface de mercure qui forme le véritable fond de ce vase. Cette observation faite, on vide le vase *d* au moyen du robinet *r*, et on l'ôte pour lui substituer successivement les trois vases *e*, *f*, *g* (Fig. 10, 11, 12). Aussitôt que l'on a versé dans ceux-ci une colonne d'eau aussi haute que dans le vase *d*, on observe que le mercure de la branche *c* s'élève exactement à la même hauteur *z'*. Donc, la pression que ces trois vases de différentes formes reçoivent sur leur fond est

exactement la même, quand la hauteur du liquide est la même, et, par conséquent, comme nous l'avons annoncé, la pression est indépendante de la forme du vase; pour le même fond, le même liquide et la même hauteur, elle est toujours la même, soit que le vase soit cylindrique (Fig. 5), soit qu'il contienne beaucoup de liquide (Fig. 6), soit qu'il en contienne très-peu (Fig. 7), soit que le vase soit droit, soit qu'il soit oblique (Fig. 8).

Pour démontrer maintenant la seconde partie de la proposition, il suffit de remarquer que dans le vase cylindrique (Fig. 5), le fond *ab* supporte exactement tout le poids du liquide; car les pressions qui s'exercent sur les parois latérales étant horizontales, elles ne peuvent contribuer en rien à soutenir le poids du liquide, ni à l'augmenter ni à le diminuer. Or, les vases obliques, élargis ou rétrécis, recevant sur leur fond la même pression que le vase cylindrique, il en résulte que dans ceux-ci la pression n'est plus égale au poids du liquide qu'ils contiennent, mais qu'elle est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le fond du vase, et pour hauteur la hauteur du niveau, comme si le vase était cylindrique.

Toutes les portions du fond étant également pressées, il est évident que si, au lieu de considérer le fond dans sa totalité, on n'en considérait qu'une partie, comme la moitié, le tiers ou le quart, la pression supportée par cette partie serait la moitié, le tiers ou le quart de la pression totale. Si l'on représente en général par s la portion du fond que l'on considère, par h la hauteur du niveau, et par d la densité du liquide, la pression sur la surface s sera exprimée par $s.d.h.$, car $s.h$ est le volume de la colonne liquide; et, pour avoir le poids, il faut multiplier le volume par le poids spécifique ou la densité.

Ainsi, avec un litre d'eau qui pèse un kilogramme, on peut exercer sur le fond d'un vase une pression très-petite, et l'on peut exercer aussi une pression infiniment grande. Pour que la pression soit d'un kilogramme, par exemple, il suffit de prendre un vase cylindrique de base quelconque; la pression totale sera toujours égale au poids du liquide, et par conséquent toujours un kilogramme : seulement, la pression sur chaque centimètre carré du fond sera plus petite ou plus grande, suivant que le vase sera plus large ou plus étroit.

Pour que la pression soit de $\frac{1}{10}$ de kilogramme, il suffit de prendre un vase dont la base soit, par exemple, un décimètre

carré, et qui soit tellement évasé que le litre d'eau n'y prenne que $\frac{1}{10}$ de décimètre ou un centimètre de hauteur.

Pour que la pression soit de 10 kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit, par exemple, d'un décimètre carré, mais tellement rétréci que le litre d'eau y prenne une hauteur de 10 décimètres ou d'un mètre.

Avec le même poids de 1 kilogramme, il serait tout aussi facile d'exercer une pression de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, etc., de kilogramme, ou une pression de 100, 1000, etc., kilogrammes.

Ce n'est pas seulement sur les fonds des vases que s'exercent les pressions verticales des liquides, elles s'exercent encore sur tous les points de l'intérieur de la masse, et se communiquent de toutes parts, en vertu du principe d'égalité de pression : concevons en effet, dans l'intérieur de la masse liquide, une couche *mp* (Fig. 13) qui soit parallèle à la surface de niveau *nn'*; toutes les molécules qui composent cette couche sont évidemment pressées par tout ce qui est au-dessus d'elles : elles sont comme si elles supportaient un piston d'un poids égal au poids du cylindre liquide *nmpn'*; seulement, cette pression qu'elle éprouve de haut en bas se transmet de bas en haut par le principe d'égalité de pression, et chacune de ses molécules n'est en équilibre que par la simultanéité de ces pressions contraires. Ainsi, en ne considérant qu'une portion *ab* de cette couche, il faut bien comprendre que la surface *ab* est à la fois pressée de haut en bas par la colonne liquide *dabc*, et de bas en haut par une force exactement égale; tellement que, si un cylindre solide était plongé dans l'eau, et que sa base vînt s'appuyer sur la surface *ab*, cette pression de bas en haut agirait sur le cylindre et tendrait à le pousser dehors.

Cette conséquence se vérifie par l'expérience suivante : *v* (Fig. 14, 15) est un tube de verre un peu épais, qui est bien *dressé* à son extrémité inférieure; *t* est un disque de verre dépoli, qui est pareillement plan, et qu'on appelle *obturateur;* il est attaché par un fil qui passe dans le tube, en sorte qu'en tirant le fil, l'obturateur vient fermer le tube; on le ferme ainsi, et on le plonge dans l'eau. Alors il n'est plus nécessaire de tirer le fil pour empêcher que l'obturateur ne tombe, parce qu'il est repoussé en haut par toute la pression de bas en haut qui s'exerce sur sa surface; et cette pression est égale à celle qu'il supporterait de haut en bas s'il était seul plongé dans l'eau à la même

profondeur. Pour en donner la preuve, on verse de l'eau dans le tube : dès que le niveau intérieur approche du niveau extérieur *nn'*, l'obturateur est poussé de haut en bas, autant qu'il était repoussé de bas en haut, et l'on voit en effet qu'il tombe par son propre poids.

Ainsi, au fond d'un bateau, si l'on faisait une ouverture, l'eau jaillirait à l'instant, et, pour l'empêcher d'entrer, il faudrait exercer une pression qui fût égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base l'ouverture, et pour hauteur la profondeur du bateau au-dessous du niveau. C'est pour cela que, dans les grands vaisseaux, la quille doit avoir une grande force pour résister aux pressions de bas en haut qui s'exercent sur le fond du bâtiment. Si ce fond était horizontal, et qu'il eût par exemple cent mètres carrés de superficie, la pression serait égale à 100 000 kilogrammes, quand le *tirant d'eau* serait d'un mètre, et à 300 000 kilogrammes, quand il serait de 3 mètres.

Nous pouvons juger par là des énormes pressions qui s'exercent dans les lacs et dans les mers, et de celles qui sont supportées par tous les éléments chimiques qui s'y trouvent, et par tous les corps vivants qui en peuplent les profondeurs.

2° La pression que supporte une paroi latérale est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour hauteur verticale la profondeur du centre de gravité de la paroi au-dessous du niveau, et pour base horizontale une surface égale à la paroi elle-même.

Les pressions latérales se déduisent des pressions horizontales correspondantes au moyen du principe d'égalité de pression : le point *m* (Fig. 13) faisant partie de la couche horizontale *mp*, cette couche lui transmet la pression qu'elle supporte elle-même; elle la transmet dans tous les sens, et par conséquent le point *m* la reçoit dans la direction perpendiculaire à la paroi dont il fait partie. Ainsi, chaque étendue d'une paroi latérale éprouve la même pression qu'une égale étendue de la couche horizontale qui lui correspond, c'est-à-dire que $s.h.d$ représente aussi les pressions latérales : seulement la surface s doit toujours être assez étroite en hauteur pour que la pression soit sensiblement la même dans toute son étendue. Dans une cuve d'eau de 10 mètres de hauteur, la pression sur un centimètre carré de la paroi latérale est donc de 100 grammes à 1 mètre

de profondeur, de 200^{gr} à 2^{m}, et de 1^{k} à 10^{m}, c'est-à-dire tout à fait au fond.

Pour avoir la somme des pressions latérales supportées par une paroi plane, qu'elle soit triangulaire, polygonale, ou de forme quelconque, on voit qu'il suffit de trouver la résultante d'un système de forces qui sont toutes parallèles, mais qui croissent proportionnellement à la profondeur, et aussi proportionnellement à l'étendue horizontale de la portion de paroi que l'on considère. C'est par cette composition de forces qu'on arrive, pour les pressions latérales, au théorème général que nous venons d'énoncer.

59. Pressions évaluées numériquement.— La pression exercée sur une surface est toujours un poids, comme nous venons de le voir; cependant il arrive souvent que l'on indique les pressions par des hauteurs de colonnes liquides, et cela peut se faire sans inconvénient lorsqu'il s'agit seulement de comparer entre elles deux pressions différentes : sur le fond d'un bassin où il y a 10 mètres d'eau en hauteur, la pression est dix fois plus grande que sur le fond d'un bassin où il n'y a que 1 mètre de ce liquide. On est dispensé de tout calcul pour faire cette comparaison. Il n'en est plus de même lorsque la pression étant donnée en colonne liquide, il devient nécessaire de la transformer en poids pour l'exprimer d'une manière absolue. Il se présente alors des unités diverses, unités de longueur et unités de poids, sur le choix desquelles il importe de ne pas se tromper. Prenons un exemple : quelle est la pression que supporte une surface qui est chargée d'une colonne d'eau de $2^{m},80$ de hauteur? Il faut se rappeler avant tout qu'une pression doit toujours essentiellement être rapportée à l'unité de surface; par conséquent la question est incomplète; il faut ajouter que la pression que l'on demande est celle qui s'exerce par centimètre carré, par décimètre carré, ou par mètre carré. Alors la solution est possible, et, dans tous les cas, la pression cherchée est égale au poids de la colonne liquide qui a pour base l'unité de surface et pour hauteur la hauteur de la colonne. Ce poids lui-même se détermine en prenant le volume et en le multipliant par le poids de l'unité de volume; on aura donc :

1° Pour le centimètre. $1 \times 280 \times 0^{kil},001 = 0^{kil},280$,
2° Pour le décimètre. $1 \times 28 \times 1^{kil} = 28^{kil}$,
3° Pour le mètre. . . $1 \times 2,8 \times 1000^{kil} = 2800^{kil}$,

en choisissant toujours pour exprimer la hauteur la même unité qui sert à exprimer la base, c'est-à-dire le centimètre dans le premier cas, le décimètre dans le second, et le mètre dans le troisième.

On aurait pu prendre pour unité de poids, le gramme dans le premier cas, et le tonneau dans le troisième, mais il vaut toujours mieux adopter une unité unique.

Réciproquement, une surface supporte une pression de $7^{kil},6$, par centimètre carré; cette pression est exercée par une colonne d'eau, quelle est la hauteur de cette colonne? Soit x cette hauteur, elle sera exprimée en centimètres, puisque cette unité est celle de la base, et l'on aura

$$1 \times x \times 0^{k},001 = 7^{k},6, \quad \text{d'où} \quad x = 7600^{cent}$$

ou 76 mètres. Ici il faut forcément exprimer en kilogrammes le poids du centimètre cube ou de l'unité de volume, ou bien transformer le poids donné $7^{k},6$.

Deuxième exemple. Une surface est pressée par une colonne de mercure de $0^{m},58$ de hauteur, quelle est la pression qu'elle supporte par centimètre carré, la densité du mercure étant par rapport à l'eau de 13,598?

L'unité de surface pour la base étant le centimètre, on prendra aussi le centimètre pour la hauteur, qui sera ainsi 58; l'unité de volume est alors le centimètre cube, qui pour l'eau pèse $0^{k},001$, et pour le mercure

$$0^{k},001 \times 13,598;$$

ainsi, sur 1 centimètre carré la pression demandée est

$$1 \times 58 \times 0^{k},001 \times 13,598 = 0^{k},789.$$

Réciproquement, sur une surface de 25 centimètres carrés, il y a une pression de 50^{k}, qui est exercée par une colonne de mercure, quelle est la hauteur de cette colonne? Soit x cette hauteur, elle sera exprimée en centimètres comme la base, et l'on aura

$$25 \times x \times 0^{k},001 \times 13,598 = 50, \quad \text{d'où} \quad x = 147^{cent}.$$

Troisième exemple. On a une surface s qui est pressée par une colonne liquide de hauteur h, et de densité d, le poids de

l'unité de volume de l'eau est ϖ, et l'on désigne par p la pression totale qui est supportée par la surface s; on a alors

$$p = s \times h \times \varpi \times d.$$

ϖ étant toujours donné, il suffira de connaître trois des quatre autres quantités p, s, h, d pour trouver la quatrième : seulement, il faut avoir soin de prendre la même unité de longueur pour exprimer s et h, en supposant que ces deux quantités sont données; quant à la valeur de ϖ, elle se déduit de l'unité de longueur que l'on a choisie : en adoptant le kilogramme pour l'unité de poids, on a $\varpi = 0^k,001$, ou $\varpi = 1^k$, ou $\varpi = 1000^k$, suivant que l'unité de longueur est le centimètre, le décimètre ou le mètre. La densité d est toujours un nombre abstrait.

La pression supportée par l'unité de surface est la pression totale p divisée par la surface s, ou

$$\frac{p}{s} = h.\varpi.d.$$

Telle est la formule générale dont il faut se servir pour ces transformations, quand la pression donnée ou cherchée se trouve rapportée à l'unité de surface.

60. Centre de pression. — Le point d'application de la résultante de toutes les pressions élémentaires est ce qu'on appelle le *centre de pression;* il est toujours placé plus bas que le centre de gravité, puisqu'il coïnciderait avec lui si les forces n'allaient pas en croissant à mesure que l'on descend. Dans une paroi qui a la forme d'un parallélogramme, le centre de pression est sur la ligne qui divise en deux parties égales les côtés horizontaux, et à $\frac{1}{3}$ de sa hauteur en partant du fond. Dans une paroi triangulaire dont la base est au fond, il est au quart d'une ligne analogue, et au contraire, quand la base est à fleur d'eau, il est à moitié.

61. Vases communiquants. — Lorsque plusieurs vases communiquent entre eux, quels que soient leur nombre et leur forme, les liquides qu'ils contiennent sont, pour l'équilibre, soumis aux deux conditions que nous avons établies précédemment. Ainsi, quand c'est le même liquide qui remplit tous les vases, il faut pour satisfaire à la première condition, que toutes les surfaces soient *de niveau*, et, pour satisfaire à la seconde, qu'elles soient *de même niveau;* car sans cela, les couches de ni-

veau de l'intérieur de la masse ne seraient pas également pressées dans toute leur étendue. En effet, dans le vase (Fig. 16, 17), si le niveau de la grande branche était par exemple en ab, au lieu d'être en n, sur la même ligne horizontale nv, la couche de niveau mp ne serait pas également pressée en m et en p, et l'équilibre n'aurait pas lieu, puisqu'une couche de niveau quelconque doit toujours être également pressée dans toute son étendue.

Quand les liquides sont différents, il faut que les surfaces aient des niveaux différents.

Dans le vase représenté figure 18, il y a de l'eau dans la grande branche et du mercure dans la petite : les liquides se touchent en g, et on mène l'horizontale gf; si les sections g et f n'avaient rien au-dessus d'elles, l'équilibre aurait lieu; ainsi, pour l'équilibre, il faut que sur chaque point de leur étendue elles soient également pressées : l'une par l'eau et l'autre par le mercure. Or, l'unité de surface de la section g supporte une pression $1.h.\varpi.d$, en désignant par h la hauteur de l'eau au-dessus de g, par ϖ le poids de l'unité de volume du liquide par rapport auquel les densités sont prises, et par d la densité de l'eau; de même l'unité de surface de la section f de la petite branche supporte une pression $1.h'.\varpi.d'$, en désignant par h' la hauteur du liquide au-dessus de f, et par d' sa densité, il faut donc que l'on ait

$$1.h.\varpi.d = 1.h'.\varpi.d', \quad \text{ou} \quad hd = h'd',$$

c'est-à-dire que les hauteurs verticales h et h' des deux liquides au-dessus de la ligne gf de jonction soient entre elles en raison inverse des densités de ces liquides. Ainsi, 1 centimètre de mercure au-dessus de f ferait équilibre à une colonne d'eau de $13^{\text{cent}},598$ au-dessus de g. La jonction des surfaces pourrait bien ne pas se faire sur une ligne horizontale, comme, par exemple, si l'on versait assez d'eau dans le vase pour refouler la colonne de mercure jusqu'en si; mais alors on conçoit que, dans ce cas, si les pressions latérales sont égales, de chaque côté, sur les molécules qui sont au centre et dans l'axe du tube, elles ne peuvent plus l'être pour les molécules qui sont au-dessus ou au-dessous. Au bord supérieur en s, la pression de l'eau l'emporte, et au contraire au bord inférieur en i, c'est la pression du mercure; la surface de jonction tend à prendre la figure $s'i'$, et l'eau finit par passer dans la petite

branche, et le mercure dans la grande, jusqu'à ce qu'enfin il s'établisse un autre équilibre.

Dans les tubes qui ont moins de 3 millimètres d'ouverture, cet effet ne se produit pas : les colonnes sont trop étroites pour se *diviser;* la cohésion des molécules de chaque liquide suffit pour résister à l'inégalité de pression qui existe entre le bord supérieur et le bord inférieur.

62. **Du niveau des mers.** — Les principes de l'hydrostatique ne trouvent pas seulement leur application dans les tubes et dans les vases étroits, sur lesquels nous pouvons expérimenter, mais ils s'appliquent pareillement à tous les liquides qui sont répandus dans la nature.

C'est par les lois précédentes que toutes les eaux de la terre sont nivelées dans les bassins profonds de la mer, et que leur vaste surface conserve tout autour du globe une forme permanente; si elle est soulevée par les tempêtes, elle est ramenée par les lois de l'équilibre dans les limites qui lui sont assignées.

Si la terre était immobile et formée de couches homogènes, la surface des mers serait rigoureusement sphérique; les navigateurs qui passent sous la *ligne*, ceux qui parcourent des plages inconnues, dans l'un ou dans l'autre hémisphère, et ceux qui visitent les côtes du Groënland ou les mers encore plus voisines du pôle, se trouveraient tous en même temps à la même distance du centre de la terre; les choses seraient ainsi par les lois de l'hydrostatique, et par la structure des parties solides du globe qui n'offrent à la surface que des saillies insensibles. De grandes inégalités dans les parties solides troubleraient la sphéricité des surfaces liquides : si la chaîne des Cordillères était seulement cent fois plus haute, les eaux seraient montantes sur les côtes de l'Amérique, vers l'orient comme vers l'occident; elles seraient descendantes sur les côtes opposées, et les ports de France seraient à sec, aussi bien que ceux du Japon.

Si la terre était immobile, et composée à l'extérieur de parties hétérogènes d'un densité très-inégale; si, par exemple, au-dessous de l'Océan, entre la croûte qui lui sert de fond et le centre de la terre, il se trouvait d'immenses cavernes qui fussent vides ou remplies de substances de faible densité, il est clair que l'intensité de la pesanteur serait beaucoup moindre sur les eaux de l'Océan que sur celles des autres mers, et qu'a-

lors la surface générale des eaux, au lieu d'être sphérique de toutes parts, devrait être renflée dans quelques endroits, et dans d'autres déprimée. Ainsi, une hétérogénéité de substances pourrait à elle seule produire des irrégularités de forme, et, si à cette cause on ajoute l'influence de la force centrifuge, on voit que la question devient encore plus compliquée. Dans l'ignorance où nous sommes sur la composition intérieure du globe, dont, avec toute notre puissance, nous ne pouvons fouiller qu'une superficie d'une profondeur insensible, il nous est tout à fait impossible de déterminer à présent quelle doit être, dans l'état de repos, la véritable courbure de la surface des eaux. C'est pour cela qu'on a essayé de la déterminer par des nivellements directs, et voici, à cet égard, les résultats auxquels on est parvenu.

La mer Méditerranée à Barcelone, et l'Océan à Dunkerque, sont sensiblement au même niveau, d'après les observations de Delambre.

La mer Méditerranée et la mer Rouge à Suez ne sont pas tout à fait au même niveau : les anciens attribuaient à la mer Rouge un excès de hauteur considérable; les ingénieurs de l'expédition d'Égypte, sous la direction de Le Père, avaient trouvé cet excès de 9 mètres; mais par une opération très-complète, exécutée en 1847 dans les conditions les plus favorables et avec le concours du vice-roi d'Égypte, M. Bourdaloue a trouvé que le niveau de Suez ne s'élève pas à plus de $2^{m},27$ au-dessus de la basse mer de Tineh et que cette différence se réduit même à $0^{m},03$ quand la mer est basse à Suez.

La mer Caspienne se trouve dans des conditions différentes : on sait qu'elle est isolée, fermée de toutes parts et sans communication avec la masse océanique. Un nivellement barométrique fait en 1812 par MM. Parrot et Engelhart, lui attribuait un niveau de 107 mètres au-dessous de la mer Noire ; mais une opération géodésique faite avec un grand soin, pendant les années 1836 et 1837, par MM. Fuss, Sawitsch et Sabler, discutée et publiée en 1849, par le célèbre directeur de l'Observatoire de Poulkowa, M. Struve, ne donne en dernier résultat que $26^{m},045$ pour l'abaissement de la mer Caspienne au-dessous de la mer Noire.

63. Le mélange des eaux des fleuves avec les eaux de la mer présente aussi quelques phénomènes remarquables d'hy-

drostatique. L'eau douce, étant plus légère, doit se tenir à la surface, tandis que l'eau salée doit, par sa pesanteur, former les couches les plus profondes. C'est, en effet, ce que M. Stevenson a observé en 1816 dans le port d'Aberdeen, à l'embouchure de la Dee, et aussi dans la Tamise, près de Londres et de Wolwich. En puisant de l'eau à diverses profondeurs avec un instrument imaginé pour cet objet, M. Stevenson a trouvé qu'à une certaine distance de l'embouchure l'eau est douce dans toute la profondeur, même à la marée montante; mais que, si l'on descend le cours de la rivière et que l'on approche un peu plus près de la mer, on trouve l'eau douce à la surface, tandis que l'eau de la mer forme les couches du fond. D'après ses observations, c'est entre Londres et Wolwich que pour la Tamise la salure du fond commence à être sensible. Ainsi, au-dessous de Wolwich, cette rivière, au lieu de couler sur un fond solide, coule véritablement sur le fond liquide formé par les eaux de la mer, avec lesquelles sans doute elle se mêle plus ou moins. Cependant M. Stevenson est d'opinion qu'à la marée montante les eaux douces sont soulevées pour ainsi dire *tout d'une pièce* par les eaux salées qui affluent et qui remontent le lit du fleuve, tandis que l'eau douce continue de couler vers la mer.

CHAPITRE VI.

De l'Équilibre des Gaz et de la Pression atmosphérique.

64. L'air est un corps qui ne tombe pas immédiatement sous nos sens, comme les corps solides ou les liquides; mais il se manifeste à nous par tant de phénomènes, sur la terre et sur les eaux, qu'il n'est pas nécessaire de chercher d'autres preuves de son existence. Il y a des orages dans tous les climats et des tempêtes sur toutes les mers; ainsi le fluide de l'air enveloppe toute la surface du globe, il forme partout une couche d'une grande épaisseur, car, dans tous les pays, sur les montagnes comme dans les plaines, on voit flotter des nuages qui sont emportés par le vent, et au-dessus de ces nuages on voit la couleur brillante du ciel, qui est une preuve de la profondeur de l'air, comme la couleur de l'Océan est une preuve de la profondeur de l'eau. S'il n'y avait pas d'air, le ciel serait sans éclat et sans couleur; il paraîtrait comme une voûte absolument noire, où l'on verrait les astres briller pendant le jour avec le même éclat que pendant la nuit. Cette grande masse d'air, qui est répandue tout autour de la terre, et dont les couches superposées s'élèvent plus haut que les plus hautes montagnes, est ce que l'on nomme l'*atmosphère*. Le sommet le plus élevé de l'Himalaya ne s'élève pas à 8000 mètres au-dessus du niveau de la mer, et nous verrons que l'atmosphère s'élève à plus de 80 000 mètres.

Les découvertes chimiques du dernier siècle nous ont fait connaître plusieurs corps qui sont différents de l'air par leur nature, mais qui sont analogues à l'air par leur transparence, par leur fluidité et par l'ensemble de leurs propriétés physiques. Tous ces corps ont reçu différents noms : d'abord on les appelait des *airs*, et l'on disait alors : *air méphitique*, *air inflammable*, *air hépatique*, *air fixe*, *air phlogistiqué*, *déphlogistiqué*, etc.; aujourd'hui tous ces corps sont ce que l'on appelle les *gaz*, ou les *corps gazeux* ou les *fluides élastiques*.

65. Les gaz sont soumis à deux espèces de forces, comme les

de capacité, qu'il se répandrait partout dans cet espace et qu'il en presserait les parois dans tous les sens, faisant encore un effort pour se répandre plus au large. On conçoit, d'après cela, combien il importe d'étudier les effets de l'air atmosphérique, car sa seule présence est une force active dans tous les phénomènes que nous observons.

67. **Conditions de l'équilibre de l'air.** — Il n'y a pour les gaz qu'une seule condition d'équilibre, savoir, que leur force élastique soit la même dans toute l'étendue d'une couche de niveau. Cette condition est analogue à la seconde condition d'équilibre des liquides (57), et elle se déduit des mêmes principes, savoir : de la mobilité des molécules et de l'action de la pesanteur qui s'exerce sur elles. Dans un vase quelconque (Pl. 4, Fig. 20), tous les points de la couche horizontale *cd* doivent avoir la même élasticité, car il faut que la force répulsive des molécules qui sont en *b* puisse arrêter la force répulsive des molécules qui sont en *b'*; et ces forces ne peuvent s'arrêter et se faire équilibre, à moins qu'elles ne soient égales dans tous les points de la couche horizontale *cd*. Il en est de même dans toutes les sections de niveau que l'on peut concevoir, soit au-dessus, soit au-dessous de *cd*; mais il est évident que la couche *mp*, par exemple, est plus pressée que *cd*, puisqu'elle supporte d'abord toute la pression qui s'exerce en *cd* et qui lui est transmise par le principe d'égalité de pression, et qu'en outre elle supporte encore tout le poids de l'air qui est compris dans la colonne *cdmp*, et qui pèse librement sur elle comme une colonne d'eau pèse sur le fond d'un vase.

Les conditions de la stabilité et de l'instabilité de l'équilibre sont aussi les mêmes que dans les liquides, et pour les mêmes raisons : l'équilibre est stable quand la densité de l'air inférieur est plus grande que celle de l'air supérieur, et il est instable quand le contraire a lieu. Mais l'équilibre instable, quoique mathématiquement possible, est toujours physiquement impossible, à cause de la grande mobilité des molécules des gaz.

Cette loi de l'équilibre de l'air est une loi universelle pour toutes les masses gazeuses, quelque petites ou quelque grandes qu'elles puissent être ; elle s'applique à l'air contenu dans un grand édifice comme à celui qui est contenu dans un vase de petites dimensions ; elle s'applique à toute la colonne d'air at-

mosphérique qui repose sur une vaste plaine ; et elle s'applique, enfin, à la masse entière de l'air qui constitue l'atmosphère. Que l'on conçoive à une hauteur quelconque, à la hauteur du mont Blanc, par exemple, une couche atmosphérique qui enveloppe la terre et qui soit parallèle à la surface des eaux, il faudra pour l'équilibre que tous les points de cette couche supportent partout la même pression, à Paris comme aux antipodes, sur les continents comme sur les mers, et dans les régions des pôles comme dans celles de l'équateur. Une seconde couche parallèle à celle-là, mais qui serait à cent mètres au-dessous, devrait, par la même raison, avoir tous ses points également pressés entre eux, et tous se trouveraient plus pressés que ceux de la première couche, du poids entier de la colonne d'air de cent mètres qu'ils supportent de plus. Ainsi, à hauteur égale, la pression doit être égale ; mais elle diminue à mesure que l'on s'élève. La nécessité d'une pression uniforme, dans une si grande étendue, fait assez comprendre que, dans l'océan de l'air, tout équilibre est impossible. Un calme universel est incompatible avec tant de mobilité, puisqu'un seul point ébranlé met toute la masse en agitation.

Les gaz ne peuvent pas, comme les liquides, avoir une surface libre sur laquelle aucune pression ne soit exercée, car nous avons dit qu'il faut un obstacle pour arrêter leur force expansive, qui est indéfinie. D'après cela, on pourrait conclure que l'atmosphère n'est pas bornée à 60 ou 80 mille mètres de hauteur, comme on le dit communément, puisqu'à cette limite les molécules de l'air, toujours poussées par leur force élastique, et ne trouvant rien qui les arrêtât, se précipiteraient dans le vide et se dissiperaient de plus en plus, jusqu'à remplir enfin toute l'immense étendue des cieux. Ainsi, l'air serait partout ; il envelopperait la lune comme la terre, il envelopperait le soleil et les planètes, et il formerait autour de ces astres des atmosphères analogues à l'atmosphère terrestre. Nous démontrerons en optique que les phénomènes observés ne justifient point ces conclusions ; et sans expliquer à présent les causes probables qui retiennent les molécules de l'air, nous adopterons l'opinion que notre atmosphère est limitée et qu'elle n'a en effet qu'environ 100 mille mètres d'étendue. Au delà est le vide ; la dernière couche de l'atmosphère est la dernière limite de la masse pondérable de la terre.

68. De la pression de l'air. — Les conditions générales de l'équilibre étant une fois posées, nous pouvons constater, par des expériences directes, que toutes les couches inférieures de l'air sont en effet pressées par les couches supérieures, et qu'elles le sont diversement suivant la hauteur à laquelle on s'élève au-dessus du niveau de la mer.

Expérience du crève-vessie. — On met sur la platine de la machine pneumatique une espèce de manchon de verre (Fig. 21) dont les parois sont très-épaisses, et qui est fermé à sa partie supérieure par une membrane de vessie, très-bien tendue et fortement arrêtée sur ses bords. Cette membrane éprouve, d'une part, la pression de l'air extérieur qui tend à l'abaisser, et, de l'autre, la pression de l'air intérieur qui tend à la soulever ; de telle sorte qu'elle reste en équilibre entre ces deux pressions opposées. Si, par quelque moyen on soufflait dans le vase une nouvelle quantité d'air, la pression intérieure deviendrait la plus forte, et la membrane se renflerait au dehors ; au contraire, si on enlève de l'air, la pression intérieure deviendra plus faible, et la membrane, cédant à la pression extérieure, devra fléchir et s'enfoncer au dedans. C'est là l'effet qu'on obtient en faisant jouer la machine pneumatique, car elle aspire peu à peu tout l'air qui est contenu dans le vase : dès les premiers coups de piston, on voit la membrane fléchir sous la pression extérieure, puis elle fléchit de plus en plus ; enfin, quand le vide est fait, on voit qu'elle est très-tendue, et par conséquent très-pressée. On peut juger qu'un poids de 100 kilogrammes, qui serait posé sur elle, lui donnerait moins de tension. Alors, si l'on donne avec le doigt un coup, même très-léger, au milieu de la membrane, elle éclate en mille pièces, et l'on entend une explosion plus forte qu'un coup de pistolet, tant est grand l'effort que fait l'air, en vertu de sa pression, pour rentrer dans le vase, car c'est en rentrant avec impétuosité qu'il produit tant de bruit.

Au lieu d'une pression de haut en bas, on aurait une pression latérale si le crève-vessie était incliné, ou une presion de bas en haut s'il était renversé ; toutes ces pressions ne produiraient pas moins d'effet que la première, ce qui prouve bien que l'air presse dans tous les sens, ou que les pressions se transmettent et deviennent aussi des pressions de bas en haut, comme il arrive dans les liquides.

Cette expérience semble d'abord très-étonnante ; on ne comprend pas comment l'air d'un appartement peut exercer une pression si prodigieuse. Il faudrait qu'il fût bien pesant s'il n'agissait que par sa pesanteur, car une colonne d'eau qui aurait toute la hauteur de l'appartement serait bien loin de produire un tel effet. C'est qu'aussi il y a une autre cause. Supposons, pour un moment, que l'expérience ait été faite en plein air; alors, d'après les principes de l'hydrostatique, la pression serait égale au poids de la colonne d'air ayant pour base la largeur de la membrane, et pour hauteur, non pas un mètre, ni dix mètres, ni cent mètres, mais toute la hauteur de l'atmosphère. Puisque sur une même couche de niveau les pressions sont toujours égales, on voit que dans un appartement la pression qui s'exerce sur le crève-vessie est aussi toute la pression atmosphérique.

En mesurant cette pression, qui fait éclater avec tant de bruit la membrane du crève-vessie, on aurait tout le poids d'une colonne d'air qui s'élève aussi haut que l'atmosphère peut s'étendre ; de même qu'un physicien pourrait, au fond de la mer, avec un appareil semblable, trouver le poids total de la colonne d'eau qui s'élève au-dessus de sa tête.

69. Mesure de la pression atmosphérique. — Puisque l'atmosphère enveloppe la terre, elle en presse tous les points, comme elle presse la membrane du crève-vessie, elle presse également toute la surface des continents et toute la surface des eaux, soit dans l'immense étendue des mers, soit dans les lacs, soit dans les vases qui servent à nos expériences.

Supposons qu'un tube plonge par une de ses extrémités dans un vase rempli d'eau (Fig. 22); le liquide se met au même niveau dans le tube et dans le vase, parce que la pression atmosphérique est la même dans l'intérieur du tube en *cd*, et au dehors sur la surface *ab*. Mais, si l'on aspire une partie de l'air contenu dans le tube, le liquide monte comme s'il était lui-même aspiré, il monte de plus en plus à mesure que l'aspiration continue; il s'arrête quand elle cesse, et la colonne soulevée reste suspendue dans l'intérieur du tube. Cette expérience, qui n'est qu'un jeu d'enfant, va nous donner le moyen de mesurer la pression atmosphérique et de trouver le poids total de l'air, comme si nous pouvions mettre toute l'atmosphère dans une balance. En aspirant l'air, on diminue la pression qui s'exerce dans l'intérieur du tube, sans rien changer à la pression exté-

rieure; celle-ci étant alors plus forte, elle force le liquide à monter jusqu'à ce que la condition d'équilibre soit remplie, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression soit la même sur toute la couche de niveau, aussi bien à l'intérieur en *cd* qu'à l'extérieur *ab*. Au moment où ces pressions sont égales, le liquide cesse de monter; mais la pression intérieure qui s'exerce sur *cd* se compose de deux parties : de la pression due au poids de la colonne soulevée, et de la pression due à l'élasticité de l'air qui reste au-dessus du sommet de cette colonne. Ainsi, en diminuant de plus en plus l'élasticité de l'air, l'eau intérieure doit s'élever de plus en plus; et enfin, si l'on épuise l'air complétement, il faudra qu'elle s'élève à tel point qu'à elle seule elle presse *cd* autant que l'atmosphère presse au dehors sur *ab*; il faudra donc que le poids de cette colonne d'eau soit égal au poids d'une colonne d'air de même base, ayant pour hauteur toute la hauteur de l'atmosphère; car, sur chaque centimètre carré de surface, l'air et l'eau ne pressent que par leur poids. Voilà donc le moyen de peser une colonne atmosphérique, quelle que soit la hauteur à laquelle elle puisse s'élever; tout se réduit à trouver un tube assez long, et à épuiser l'air assez complétement. Pascal en fit l'expérience à Rouen, en 1646; son tube avait 46 pieds de long, et, pour s'éviter la peine d'en épuiser l'air peu à peu, ce qui aurait été impossible en ce temps-là, il le fit sceller à un bout, le remplit de vin, et ferma l'autre bout avec un bouchon. Alors, par le moyen de cordes et de poulies, le tube fut redressé verticalement, et l'extrémité inférieure fut plongée dans un vase d'eau. Au moment où l'on enleva le bouchon qui la tenait fermée, toute la colonne liquide s'abaissa dans le tube jusqu'à ce que son sommet fût à environ 32 pieds au-dessus du niveau de l'eau du vase. Dans les 14 pieds qui étaient au-dessus, il n'y avait point d'air, c'était le vide. Ainsi, la colonne liquide faisait à elle seule équilibre à la pression atmosphérique; d'où il suit qu'une colonne d'eau ou de vin de 32 pieds de hauteur pèse autant qu'une colonne d'air de même base. Ainsi, chaque point de la surface de la terre est pressé comme s'il était recouvert d'une couche d'eau de 32 pieds de hauteur; et nous, qui vivons au fond de l'océan de l'air, nous sommes pressés de toutes parts comme si nous étions au fond d'un lac, avec 32 pieds d'eau au-dessus de nos têtes, le vide étant fait sur le lac.

C'est à des fonteniers de Florence que nous devons le premier germe de cette découverte. Ayant eu l'occasion de faire un corps de pompe qui avait plus de 32 pieds de hauteur, ils virent avec grande surprise que l'eau ne voulait pas monter jusqu'à son sommet. A cette époque, on expliquait l'ascension des liquides, en disant que la nature avait *horreur du vide*, et qu'elle y poussait les liquides pour le remplir. Les explications par *les causes occultes* n'étaient pas de celles dont Galilée pût se contenter : aussi, dès qu'il eut connaissance du fait observé par les fonteniers, il supposa que la pesanteur de l'air en était la véritable cause. Torricelli, son disciple, en donna la preuve la plus décisive ; voici à peu près son raisonnement : Pour exercer des pressions égales, les colonnes liquides doivent avoir des hauteurs qui soient en raison inverse de leur densité ; donc, un liquide qui pèserait deux fois autant qne l'eau, ferait équilibre à l'atmosphère avec une colonne de 16 pieds, et le mercure, qui pèse à peu près quatorze fois autant que l'eau, doit faire équilibre avec une colonne qui est la quatorzième partie de 32 pieds, ou environ 28 pouces. C'est une conséquence facile à vérifier. On prend un tube de verre d'un mètre de longueur, fermé par un bout ; on le remplit de mercure, et ensuite, après l'avoir bouché avec le doigt, on le retourne verticalement pour en plonger l'extrémité dans une cuvette remplie de même liquide (FIG. 23). Aussitôt qu'on enlève le doigt, le mercure intérieur descend de plusieurs centimètres, puis il s'arrête ; l'équilibre est établi, la colonne liquide qui reste suspendue dans le tube est une balance qui donne le poids de l'atmosphère. Cet appareil est le *baromètre*. La colonne d'eau de Pascal était un véritable baromètre à eau. Le vide qui est au-dessus de la colonne barométrique s'appelle le *vide barométrique*, ou le *vide de Torricelli*.

Nous pouvons à présent mettre une grande exactitude dans nos résultats. La *hauteur* du baromètre est la hauteur verticale du sommet *s* (FIG. 23), au-dessus du niveau *ab* ; elle n'est pas la même dans tous les lieux, mais sur les bords de la mer elle est ordinairement de 76 centimètres.

C'est là la hauteur que l'on adopte comme *hauteur normale*, à laquelle on rapporte toutes les autres. Admettons donc pour un instant que l'air soit calme et en repos dans toute l'étendue de l'atmosphère, que l'équilibre soit partout établi, et que le

baromètre au niveau des mers marque exactement 76 centimètres de hauteur; il nous sera facile de trouver la véritable mesure de la pression atmosphérique, et de l'exprimer en kilogrammes. En effet, la hauteur totale de la colonne d'air est inconnue; mais la pression qu'elle exerce sur sa base est justement égale à la pression exercée par la colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur qui lui fait équilibre. Or, la pression due à celle-ci, sur l'unité de surface, est, comme nous l'avons vu (59), égale à son poids, c'est-à-dire à son volume multiplié par le poids de l'unité de son volume, ou enfin, à

$$1.76.\varpi.d;$$

ϖ étant le poids du centimètre cube d'eau, ou $0^k,001$, et d la densité du mercure, ou 13,598; ce qui donne, en faisant le calcul, $1^k,033$ pour la pression atmosphérique rapportée au centimètre carré. Mais cette pression a pour seule et unique cause la pesanteur de l'air; elle résulte de la somme des poids de toutes les molécules qui composent la colonne entière ayant pour base un centimètre, et pour hauteur toute la hauteur de l'atmosphère; donc cette colonne, d'une hauteur inconnue, pèse exactement $1^k,033$. Sur un décimètre carré, la pression serait cent fois plus grande, puisqu'il y a cent centimètres carrés dans un décimètre carré; elle serait donc de $103^k,3$, et sur un mètre carré, elle serait, par la même raison, 10330^{kil}. Enfin, en représentant par s la surface entière de la terre, estimée en mètres carrés, la pression de l'atmosphère entière sur le globe serait $10330^k \times s$; et elle représenterait en kilogrammes le poids total de l'air et des vapeurs qui constituent l'atmosphère. Par des observations barométriques assidues, on peut donc reconnaître si cette masse de substances gazeuses éprouve des variations brusques ou séculaires, et si elle a sensiblement changé depuis l'époque où Pascal et Torricelli l'ont pesée pour la première fois.

Si les couches d'air étaient homogènes à toutes les hauteurs, on pourrait déduire de ce qui précède la véritable hauteur de l'atmosphère; car cette hauteur x et la hauteur 76 du baromètre seraient entre elles en raison inverse des densités de l'air et du mercure, et l'on aurait

$$\frac{x}{76} = \frac{13,598}{d}, \quad \text{ou} \quad x = \frac{76 \cdot 13,598}{d};$$

d étant la densité de l'air par rapport à l'eau. Or, nous avons déjà dit (**46**) qu'un mètre cube d'air, dans les conditions normales de température et de pression, pèse $1^k,2991$. Par conséquent la densité de l'air est 0,0012991, et la hauteur de l'atmosphère serait de

$$795510^{\text{cent}} \text{ ou de } 7955^{\text{mètres}}.$$

Mais il s'en faut de beaucoup que l'air soit homogène; sa densité diminue à mesure que la hauteur augmente, et c'est la loi de cette diminution qui détermine la véritable hauteur totale de l'atmosphère.

Le baromètre à mercure ayant une hauteur normale de 76 centimètres, le baromètre à colonne d'eau aurait exactement une hauteur x donnée,

$$\frac{x}{76}=\frac{13,598}{1},$$

puisque la densité 13,598 du mercure est rapportée à celle de l'eau prise pour unité, il en résulte $x = 1033^{\text{c.m}}$ ou $10^{\text{m}},33$.

On peut donc dire indifféremment que la pression atmosphérique est *représentée* par une colonne de mercure de 76 centimètres, ou par une colonne d'eau de $10^{\text{m}},33$; mais cette pression ne peut véritablement être *exprimée* qu'en poids, et elle est égale à $1^k,033$, sur chaque centimètre carré.

70. Construction du baromètre. — On donne à cet instrument des formes différentes suivant l'usage auquel on le destine; mais il y a quelques conditions générales d'exactitude qu'il faut toujours remplir, quelle que soit la forme que l'on adopte.

1° Il faut que le mercure soit parfaitement pur, afin qu'il ait son exacte densité.

2° Quand la colonne monte ou descend dans l'intérieur du tube, la surface extérieure s'abaisse ou s'élève, et il faut disposer l'appareil pour qu'on puisse à chaque instant mesurer la vraie hauteur du baromètre, c'est-à-dire la hauteur verticale du niveau intérieur au-dessus du niveau extérieur.

3° Il faut que le vide soit parfait au-dessus du sommet de la colonne barométrique, car, s'il restait un peu d'air dans cet espace, ou s'il y avait quelques vapeurs, ce serait une force élastique qui agirait sans cesse pour repousser le mercure, et qui l'empêcherait de monter à son vrai niveau.

Pour obtenir le vide aussi exactement qu'il soit possible, on

fait bouillir le mercure de la manière suivante (Fig. 19) : on remplit le tube au tiers de sa longueur, et on le fait bouillir à plusieurs reprises dans toute cette étendue; ensuite on verse une nouvelle quantité de mercure qui soit un peu chaud, pour ne pas faire éclater le tube, et on recommence l'ébullition dans toute la longueur de cette nouvelle colonne; on ajoute ainsi de nouvelles quantités de mercure, que l'on fait successivement bouillir jusqu'à ce qu'enfin l'ébullition ait parcouru toute la longueur du tube ou à très-peu près; alors on achève de le remplir avec du mercure bouilli, puis, après le refroidissement, on le retourne. Pour vérifier si, par le retournement, on n'aurait pas laissé entrer quelques bulles d'air, il faut incliner le tube un peu vivement afin que le mercure vienne en frapper le sommet : s'il donne un coup sec, on peut espérer que le vide est assez bien fait, sinon l'opération est certainement manquée.

Quand toutes ces conditions sont remplies, il y a encore, en général, deux corrections à faire pour avoir la hauteur du baromètre : l'une est relative à la *capillarité*, et l'autre à la *température* à laquelle se trouvent l'échelle des divisions et le mercure lui-même au moment de l'observation. Nous donnerons, dans la Météorologie, les tables nécessaires pour faire les corrections qui dépendent de ces causes.

On distingue en général deux sortes de baromètres : les *baromètres à siphon* et les *baromètres à cuvette*. Les premiers sont ceux dont le tube est recourbé à sa partie inférieure en forme de siphon (Fig. 24), tandis que, dans les derniers, le tube est tout droit et plonge par son extrémité dans une cuvette plus ou moins large (Fig. 23 et 32).

71. Le baromètre ordinaire est un baromètre à siphon (Fig. 24), porté sur une monture de bois; l'*échelle des hauteurs* est ordinairement de métal; le *zéro* de la division est fixe, et il se trouve au niveau du mercure de la courte branche; ce niveau changeant quand le baromètre change, il en résulte des erreurs d'autant plus grandes que la courte branche est plus étroite. Quelquefois le coude du siphon est en fer, et il porte un robinet de même métal : alors, pour transporter cet instrument, on l'incline d'abord de manière que la branche fermée se remplisse complétement de mercure; puis l'on ferme le robinet, et l'on a moins à craindre que l'air ne pénètre dans le tube par les secousses du voyage.

72. Le baromètre à cadran de Jecker a quelque avantage sur le baromètre ordinaire ; il est représenté dans les figures 29, 31. La branche ouverte du siphon porte un flotteur de fer muni d'une très-fine crémaillère *a*, qui engrène dans une roue dentée *b*, dont l'axe très-mobile porte l'aiguille *c*, qui parcourt les divisions du cadran *d*; il est très-facile de graduer cet instrument de manière que la véritable hauteur du baromètre, à un instant donné, se trouve écrite au point où l'extrémité de l'aiguille s'arrête. Ce même baromètre, disposé et suspendu convenablement (Fig. 30), devient un *baromètre marin*, qui donne de bonnes observations à bord, malgré les oscillations du bâtiment.

73. Le baromètre de M. Gay-Lussac est exclusivement adopté par les voyageurs, comme étant parfaitement exact, facile à observer, et surtout facile à transporter; il est représenté dans les figures 25, 26 : la branche ouverte n'est percée que d'un trou capillaire *a*, bien assez grand pour laisser entrer l'air librement, mais trop petit pour laisser sortir le mercure; il en résulte qu'on peut le renverser sans craindre que le mercure s'échappe (Fig. 26). Lorsque, après l'avoir renversé pour le transporter, on le retourne pour faire une observation, il n'y a pas à craindre non plus que l'air pénètre dans la branche fermée et arrive au sommet de la colonne de mercure pour la déprimer : Bunten y a pourvu par une disposition ingénieuse qui est représentée dans la figure 27, où l'on voit sur une plus grande échelle la branche ouverte et seulement la partie inférieure de la branche fermée. On remarque au bas de celle-ci un évasement *b*, dans lequel plonge une pointe *c*; avec un peu d'adresse, on fait aisément cette soudure à la lampe. Lorsqu'un baromètre est ainsi construit, si de l'air se présente pour monter dans le vide, il ne peut pas pénétrer par la pointe *c*, mais il va se loger en *d*, vers le haut de l'évasement; et, quand on remarque qu'il s'en est rassemblé là une certaine quantité, on le fait sortir par le retournement, afin que la pointe *c* reste toujours baignée dans le mercure.

Dans ces baromètres, les divisions sont tracées au diamant sur la branche ouverte et sur la branche fermée, et il n'y a aucune correction à faire pour la capillarité, parce que ces deux branches sont égales. Ce baromètre se monte dans une canne ou dans un étui de fer-blanc (Fig. 28).

74. Baromètre de Fortin. — Le baromètre de Fortin (Fig. 32,

33, 34, 35) est un baromètre à cuvette; ce qui le distingue, c'est qu'il est à échelle fixe; les divisions de l'échelle sont comptées à partir de l'extrémité d'une pointe d'ivoire qui pénètre dans la cuvette, et que l'on voit en *a* (Fig. 33). Lorsqu'on veut faire une observation, le baromètre étant bien vertical, il faut avant tout amener le niveau du mercure de la cuvette exactement en contact avec l'extrémité de cette pointe d'ivoire; et l'on y parvient aisément au moyen du fond mobile *fm* (Fig. 33), car le mercure monte ou descend suivant que l'on tourne la vis *v* dans un sens ou dans l'autre.

Le tube de métal qui enveloppe le tube de verre est fendu des deux côtés vers sa partie supérieure, et porte les divisions, qui sont comptées, comme nous venons de le dire, de l'extrémité même de la pointe d'ivoire, de telle sorte qu'il suffit de diriger par les deux fentes un rayon visuel qui rase la surface de la colonne, et de voir à quelle division il correspond. Pour éviter les erreurs que l'on pourrait commettre en s'écartant au-dessus ou au-dessous de la ligne horizontale, il y a un curseur *c* qui glisse sur le tube de métal, et qui n'est ouvert que dans une petite partie de sa hauteur; la fenêtre qui est en avant et celle qui est derrière se terminent par deux plans de même niveau, perpendiculairement à la longueur du tube. On abaisse le curseur jusqu'à ce que le rayon visuel qui rase ces plans rase pareillement le sommet de la colonne; alors il suffit de voir à quelle division du tube correspondent les plans, ce qui est très-facile, parce qu'ils forment le *zéro* du vernier du curseur. De cette manière on peut avoir la hauteur du baromètre à moins de $\frac{1}{20}$ de millimètre.

75. **Variations du baromètre.** — Nous ne savons rien de ce qui se passe dans les hautes régions de l'air; ici, à la surface de la terre, nous observons des changements de température, tantôt périodiques, tantôt brusques et inattendus; nous observons des vents et des orages, mais nous ne pouvons juger des secousses atmosphériques que jusqu'à la hauteur où l'agitation des nuages nous en permet l'observation. Au moyen du baromètre nous serons instruits de ce qui se passe dans toute la hauteur de l'atmosphère; car il nous donne à chaque instant le poids de la colonne d'air, et c'est exactement comme si nous avions toute cette colonne en équilibre sur une balance.

On présume bien, d'après cela, que dans un même lieu le

baromètre ne reste pas stationnaire dans le cours d'une année, et qu'il éprouve des variations plus ou moins considérables : en effet, à Paris, par exemple, il n'y a presque pas de jours où il ne change de plusieurs millimètres. En général, on distingue deux sortes de variations dans le baromètre : les variations *accidentelles*, et les variations *horaires :* celles-ci se reproduisent très-régulièrement à des heures marquées, et sont d'une grandeur constante ; les autres surviennent irrégulièrement sans qu'on en puisse prévoir ni l'époque ni l'étendue. Mais pour les apprécier, il faut savoir d'abord ce qu'on appelle la *hauteur moyenne* du baromètre.

76. **Hauteurs moyennes.** — Comme les variations ne sont jamais très-promptes, si l'on observait le baromètre d'heure en heure vingt-quatre fois dans la journée, qu'on ajoutât les vingt-quatre hauteurs observées, et qu'on en prît la vingt-quatrième partie, on aurait la *hauteur moyenne du jour* très-exactement ; car on aurait le même résultat que si l'on eût observé de demi-heure en demi-heure, ou même de minute en minute. Mais l'on conçoit que, s'il fallait essentiellement passer par les vingt-quatre observations pour avoir la hauteur moyenne d'un jour, il faudrait, quelle qu'en soit l'importance, désespérer d'y arriver jamais. Quel observateur pourrait s'assujettir, pendant des années entières, à une régularité aussi minutieuse et aussi mécanique ?

Heureusement, il existe une heure de la journée où la hauteur du baromètre est très-sensiblement la hauteur moyenne du jour : cette heure est, dans nos climats, l'heure de midi. Ainsi, on est dispensé de faire vingt-quatre observations dans la journée ; que l'on en fasse une seule avec exactitude à l'heure de midi, et l'on aura la hauteur que l'on cherche. On conçoit qu'en ajoutant les trente hauteurs moyennes des trente jours du mois, et en prenant le trentième de la somme, on aura la *hauteur moyenne du mois*, et qu'en traitant de même les douze moyennes des douze mois, on aura enfin la *hauteur moyenne de l'année*.

77. **Variations accidentelles.** — Dans nos climats, et surtout dans les régions septentrionales, le baromètre est en oscillation continuelle au-dessus et au-dessous de la moyenne de l'année ou de la moyenne générale, et quelquefois il éprouve des secousses presque subites qui le font monter ou descendre de plusieurs centimètres. A Paris, dans sa plus grande éléva-

tion, il a atteint une fois 781 millimètres, et, dans sa plus grande dépression, il est tombé une fois à 719; et, chose digne de remarque, ces maximum d'élévation et d'abaissement ont eu lieu dans la même année, en février et en décembre 1821.

Les variations du baromètre indiquent un changement présent dans l'atmosphère; beaucoup de personnes pensent qu'elles annoncent aussi un changement futur, et qu'il suffit de savoir bien consulter le baromètre, pour prédire à coup sûr la pluie ou le beau temps plusieurs jours à l'avance : c'est une question de météorologie que nous examinerons plus tard. Mais, pour le moment, nous donnerons la mesure d'un autre effet, c'est-à-dire de la différence des pressions que nous éprouvons par les variations barométriques. Ces variations se déduisent du tableau suivant :

HAUTEUR du baromètre en millimètres.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.	HAUTEUR du baromètre en millimètres.	PRESSION sur un mètre carre en kilogr.	HAUTEUR du baromètre en milimètres.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.
mm	k.	mm	k.	mm	k.
500	6792	600	8152	700	9510
510	6929	610	8287	710	9646
520	7065	620	8423	720	9782
530	7201	630	8559	730	9918
540	7336	640	8695	740	10054
550	7472	650	8831	750	10189
560	7608	660	8967	760	10325
570	7744	670	9105	770	10161
580	7880	680	9638	780	10597
590	8046	690	9374	790	10733

On voit que, le baromètre étant à 780 mill., une surface de un mètre carré supporte 10597 kilogr., et que cette énorme charge se réduit à 9782 kilogr. quand le baromètre tombe à 720; ainsi, la surface entière de notre corps étant à peu près de un mètre carré, nous sommes dans ces circonstances soulagés d'un poids de 815 kilogr. Une cause aussi puissante exerce nécessairement une influence sur les fonctions physiologiques, et surtout sur les phénomènes de la respiration et de la circulation; mais ces effets sont en général si compliqués, qu'il faudra sans doute de longues expériences pour parvenir à les démêler.

La hauteur de 600 millimètres est à peu près celle qui a lieu

au-dessus du mont Dore et à la poste du mont Cenis. Un voyageur qui part du niveau de la mer pour s'élever sur ces montagnes est soulagé d'un poids de 2173 kilogrammes, et il est soulagé de 3539 kilogrammes lorsqu'il arrive en un lieu où le baromètre marque seulement 500 millimètres : c'est à peu près sa hauteur ordinaire au sommet de l'Etna et sur le mont Liban. On sait tout ce que les voyageurs racontent des sensations extraordinaires que l'on éprouve sur les hautes montagnes où le baromètre ne marque plus que 400 ou 500 millimètres. On voit de toutes parts un immense horizon, on est soulagé d'un pesant fardeau, on ne respire qu'un air pur et léger, et il semble en effet que l'on ne touche plus à la terre.

Les variations accidentelles du baromètre n'ont pas la même étendue dans tous les climats ni à toutes les hauteurs; les limites entre lesquelles elles s'accomplissent sont en général d'autant plus écartées l'une de l'autre que la latitude est plus grande. Dès 1690, le père de Bèze avait reconnu qu'à Pondichéry et à Batavia le baromètre reste immobile, quelles que soient les tempêtes que l'on éprouve: Legentil avait confirmé ces observations; et maintenant il est bien démontré que, dans toute la zone équatoriale, le baromètre est en effet insensible aux secousses atmosphériques, mais qu'il éprouve cependant des variations périodiques et régulières, que l'on appelle variations horaires.

78. **Variations horaires.** — C'est vers l'année 1722 que les *variations horaires* du baromètre furent constatées d'une manière certaine par les observations d'un Hollandais dont le nom reste inconnu. Depuis cette époque, plusieurs observateurs ont essayé d'en déterminer l'étendue et les périodes pour différents lieux de la terre. M. de Humboldt a démontré, par de longues séries d'observations très-précises, que, sous l'équateur, le *maximum* de hauteur correspond à 9 heures du matin; passé 9 heures, le baromètre descend jusqu'à 4 heures ou même 3 heures $\frac{1}{2}$ de l'après-midi, où il atteint son *minimum;* ensuite il remonte jusqu'à 11 heures du soir, où il arrive à un second *maximum*, et il redescend enfin jusqu'à 4 heures du matin. Ainsi, chaque jour il passe par les deux *minimum* de 4 heures du matin et de 4 heures du soir, et par les deux *maximum* de 9 heures du matin et de 11 heures du soir. Les mouvements de dépression et d'ascension sont si réguliers qu'ils pourraient

servir à marquer les heures, comme les mouvements de l'horloge : seulement, ils ont peu d'amplitude; car ils s'accomplissent dans une longueur que M. de Humboldt évalue à deux millimètres depuis le point le plus haut du matin jusqu'au point le plus bas de l'après-midi.

Dans nos climats, ces variations horaires sont tellement dissimulées par les variations accidentelles, qu'il fallait, pour les découvrir et pour les mesurer, toute la sagacité et toute la précision d'un observateur tel que Ramond. Ce n'est que par les moyennes de plusieurs mois d'observations prises avec exactitude et aux heures convenables que l'on peut trouver les périodes horaires. Ramond a reconnu que leurs époques varient avec les saisons. En hiver, le *maximum* est à 9 heures du matin, le *minimum* à 3 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 9 heures du soir.

En été, le *maximum* a lieu avant 8 heures du matin, le *minimum* à 4 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 11 heures du soir.

Au printemps et en automne, les heures *critiques* sont intermédiaires, se rapprochant plus ou moins de celles de l'été ou de celles de l'hiver. L'étendue absolue des variations est un peu moindre qu'à l'équateur. Dans les latitudes les plus élevées, il faut comparer et discuter un plus grand nombre d'observations pour en faire sortir les périodes horaires; et, sur ce point, la science a beaucoup à désirer.

79. **Loi de Mariotte.** — La loi de Mariotte est la loi de la compressibilité des fluides élastiques; elle peut s'énoncer ainsi: *Les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions qu'ils supportent.* Pour démontrer par l'expérience cette vérité fondamentale, on prend un tube recourbé (Fig. 36), dont la courte branche est cylindrique et fermée à son extrémité supérieure, tandis que la longue branche reste ouverte pour recevoir la pression atmosphérique. On y verse du mercure, d'abord en petite quantité; ensuite, en inclinant le tube pour faire sortir une partie de l'air de la courte branche, on arrive facilement à mettre le mercure au même niveau des deux côtés. Alors, l'air enfermé dans l'espace *ab* se trouve exactement sous la pression atmosphérique; et si, à partir de ce point, on le force à se resserrer dans la moitié, le tiers ou le quart de la longueur *ab*, on aura réduit son volume à la moitié, au tiers ou au quart,

parce que le tube est cylindrique. Pour réduire ainsi le volume, on verse du mercure par la branche ouverte, et l'on en verse jusqu'à ce que le sommet de la petite colonne soit parvenu au point *m*, milieu de la longueur *ab*; ce point *m*, et le point *n* qui lui correspond dans la grande branche, supportent l'un et l'autre la même pression, puisqu'ils sont au même niveau; cette pression est de deux atmosphères, car elle se compose du poids de la colonne *ns*, que l'on trouve toujours égale en hauteur à la colonne barométrique, et de la pression atmosphérique elle-même qui s'exerce encore au sommet de la colonne. Donc, il a fallu une pression double pour réduire à moitié le volume de l'air contenu dans la courte branche. En donnant à l'appareil une branche ouverte beaucoup plus longue, on démontre de la même manière qu'il faut une pression de trois atmosphères pour réduire le volume au tiers, et de quatre atmosphères pour le réduire au quart de ce qu'il était sous une seule pression atmosphérique. Dans ces limites, cette loi s'applique à tous les gaz. Mais MM. Arago et Dulong ont démontré qu'elle s'applique à l'air sans aucune variation, jusqu'à 27 atmosphères. Voici les moyens qu'ils ont employés pour constater cette vérité.

Les appareils étaient établis au collége Henri IV dans une vieille tour carrée, au centre de laquelle on avait pu facilement élever un mât en bois de plus de 30 mètres de hauteur. Au pied du mât était un vase de fonte avec un manomètre et une pompe foulante, et contre sa hauteur un tube vertical en verre de 26 mètres de longueur (il était composé de 13 tubes de 2 mètres mis bout à bout).

On prendra une idée de cette disposition en jetant les yeux sur les figures 6, 7, 8, planche 5.

v est le vase en fonte,

p, la pompe foulante,

mn, le manomètre, fermé à son extrémité supérieure,

t, le tube vertical, ouvert en haut,

a, le mât contre lequel il s'élève.

Si l'on suppose, 1° que le vase de fonte contienne du mercure, 2° que le tube du manomètre soit *calibré* et contienne de l'air sec, 3° que le mercure s'élève d'abord à la même hauteur dans le tube du manomètre et dans le tube vertical *t*, il est évident que l'air sera enfermé sous la pression atmosphérique, et que l'on connaîtra le volume qu'il occupe sous cette pres-

sion. Maintenant si, à partir de ce point, l'on fait agir la pompe foulante pour introduire de l'eau au-dessus de la surface supérieure du mercure dans le vase de fonte, on exercera ainsi des pressions toujours croissantes sur l'air sec du manomètre, et en même temps le mercure s'élèvera de plus en plus dans le tube vertical. Enfin, pour avoir à chaque instant le volume de l'air comprimé, il suffira d'observer exactement la longueur qu'il occupe encore dans le tube du manomètre à partir de l'extrémité fermée; et pour avoir la pression correspondante, il suffira de mesurer la différence des niveaux du mercure dans le tube du manomètre et dans le tube vertical.

On conçoit facilement que des expériences de cette nature exigent toute l'habileté dont MM. Arago et Dulong ont donné tant de preuves par leurs belles découvertes dans toutes les branches de la physique. Il nous serait impossible de décrire ici, dans tous ses détails, la perfection avec laquelle les diverses pièces de l'appareil étaient coordonnées, et toutes les précautions ingénieuses qui avaient été prises pour assurer l'exactitude des résultats. Nous indiquerons seulement quelques-unes des dispositions les plus essentielles de la pompe foulante, du tube vertical et du manomètre.

Pompe foulante. — Il ne fallait pas seulement que la pompe foulante fût assez bien faite pour injecter l'eau sous une pression de 27 atmosphères, il fallait encore qu'elle pût maintenir l'eau injectée d'une manière assez rigoureuse pour que les sommets des colonnes de mercure fussent parfaitement fixes dans le manomètre et dans le tube vertical. Cette condition était remplie au moyen de la soupape *b*, qui se trouve au bas de la course du piston (Fig. 8).

Tube vertical. — Il était composé de 13 tubes de cristal ayant 2 mètres de longueur, 5 millimètres de diamètre intérieur et 5 millimètres d'épaisseur; ces tubes étaient réunis par de fortes viroles, comme on le voit en *c* (Fig. 8), et plus en détail dans la figure 6. La plaque horizontale *h* sert de repère, il y en a une pareille au bas de chaque tube, et l'on mesure la distance de deux repères consécutifs en posant une règle divisée *r* sur le repère inférieur, et en poussant une petite languette *l*, jusqu'à ce qu'elle se trouve à l'affleurement du repère supérieur. Pour que les tubes inférieurs ne fussent pas surchargés et comme écrasés par le poids des tubes supérieurs, on

avait eu soin d'attacher à l'extrémité supérieure de chaque tube des cordons qui redescendaient verticalement après avoir passé sur des poulies, et qui étaient tirés en bas par des poids équivalant en somme au poids du tube (Fig. 8). Ainsi, la colonne n'exerçait aucune pression sur sa base.

Manomètre. — Le tube manométrique était semblable aux tubes de la colonne verticale : il avait été effilé à son extrémité supérieure, divisé avec soin en capacités égales, sans rien tracer au diamant sur sa surface, de peur d'affaiblir sa résistance, et ensuite mis en place. Alors on y avait fait passer pendant longtemps un courant d'air sec, et enfin on avait scellé à la lampe son sommet effilé, sans faire éprouver une altération sensible à sa graduation. On voit dans la figure 7 comment l'extrémité inférieure du tube manométrique est ajustée sur la platine *e* du vase de fonte; on doit remarquer que la virole se recourbe sous l'épaisseur du tube, afin que la pression ne tende pas à le soulever. Pour que l'air du manomètre fût bien maintenu à la même température, on l'avait enveloppé d'un manchon de verre *k*, dans lequel passait continuellement un courant d'eau. Enfin, pour avoir avec une grande exactitude la position du sommet de la colonne de mercure, on avait disposé en dedans du manchon un voyant *x* avec une loupe; cette pièce devait monter et descendre, et on lui donnait ces mouvements au moyen d'un tourniquet *q*, sur lequel était enroulé un fil de soie qui allait passer sur les poulies supérieures *y*, sur la poulie inférieure *z*, et qui venait s'attacher à la garniture du voyant.

Des thermomètres convenablement disposés donnaient à chaque instant la température des diverses parties de l'appareil; et des baromètres, l'un supérieur et l'autre inférieur, donnaient aussi la pression atmosphérique au sommet et à la base de la colonne verticale.

Tels sont les moyens qui ont servi à démontrer sur l'air la loi de Mariotte jusqu'à 27 atmosphères, et l'on ne peut guère douter qu'elle ne s'étende au moins jusqu'à 50 atmosphères sans altération sensible.

MM. Arago et Dulong n'ayant pu éprouver d'autres gaz, j'ai construit un appareil pour comparer leur compressibilité à celle de l'air jusqu'à 100 atmosphères (voy. n° 156).

La densité d'un corps étant en raison inverse du volume qu'il occupe, on peut encore exprimer la loi de Mariotte en

disant que *les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions qu'ils supportent*. Sous une seule pression atmosphérique, le densité de l'air étant à peu près la 770^e partie de la densité de l'eau, il en résulte que, sous une pression de 770 atmosphères, l'air est aussi dense que l'eau. Ainsi, au fond de la mer, à une profondeur de 7000 ou 8000 mètres, l'air serait plus pesant que l'eau, et, quoiqu'à l'état gazeux, il ne pourrait pas s'élever pour venir à la surface.

Deux volumes successifs, occupés par un gaz, et les deux pressions correspondantes, forment quatre quantités qui sont en proportion inverse; de telle sorte que, trois étant données, on peut trouver la quatrième. Il en serait de même de deux densités successives, avec les deux volumes ou avec les deux pressions correspondantes.

80. De la machine pneumatique. — La machine pneumatique est destinée à faire le vide; elle se compose de deux corps de pompe cylindriques pareils à celui qui est représenté en *a* (Pl. 5, Fig. 1).

b est un piston qui monte et qui descend au moyen de la tige *c*; mais, dans toutes les positions qu'il peut prendre, il *tient le vide*, c'est-à-dire que rien ne peut passer entre son contour et les parois du corps de pompe.

s est la soupape du piston; elle est très-légère et s'ouvre de bas en haut; elle se lève quand la pression inférieure est un peu plus grande que la pression supérieure, et, dans le cas contraire, elle reste hermétiquement fermée.

La longue tige *ed* est la soupape du corps de pompe; c'est le piston qui l'ouvre et qui la ferme : quand il monte, il la soulève, le renflement *d* vient s'appuyer contre la plaque supérieure du corps de pompe, et le piston glisse à frottement dur sur toute la longueur de la tige; quand il descend, il l'entraîne avec lui, le tronc de cône *e* tombe dans l'ouverture conique qui est au-dessous, sa base ne fait qu'un seul plan avec le fond du corps de pompe, et le piston vient s'appliquer exactement sur ce plan.

Au fond de l'ouverture conique, le *conduit* de la machine prend naissance; il s'étend ensuite jusqu'en *v*; à cette extrémité il porte un pas de vis propre à recevoir des ballons, des récipients, ou d'autres vases dans lesquels on veut faire le vide.

p est la *platine* de la machine pneumatique; elle se compose

d'une forte plaque de métal sur laquelle on mastique un plateau de verre épais, dont la surface supérieure est *dressée* avec soin et légèrement *doucie*.

h est une *cloche* où l'on fait le vide; son bord inférieur est pareillement dressé et douci, afin qu'il puisse s'appliquer exactement sur la platine. Une légère couche de suif achève d'établir l'adhérence; car il ne faut pas que l'air extérieur puisse pénétrer entre la cloche et la platine.

Supposons que le piston soit au milieu de sa course; que les soupapes soient ouvertes, et que l'air soit sous la pression atmosphérique, dans la cloche, dans le conduit et dans le corps de pompe; si l'on abaisse le piston, la seconde soupape se ferme, et l'air ne peut plus repasser du corps de pompe dans la cloche; il s'échappe par la première soupape *s*, et il n'en reste plus quand le fond du piston est venu s'appliquer sur le fond du corps de pompe. Alors, le piston étant soulevé, le vide se ferait au-dessous de lui, si les soupapes restaient fermées; mais la seconde soupape s'ouvre, l'air de la cloche arrive pour remplir le vide, et la première soupape reste fermée à mesure que le piston s'élève, parce que la pression intérieure est toujours moindre que la pression extérieure. Si la capacité du corps de pompe est, par exemple, la dixième partie de la capacité de la cloche et du conduit, il arrivera dans le corps de pompe $\frac{1}{11}$ de l'air qu'il faut enlever pour avoir le vide. On rabaisse le piston; la seconde soupape se ferme, et l'air se comprime de plus en plus; bientôt son élasticité l'emporte sur celle de l'air extérieur; il soulève la première soupape et s'échappe dans l'atmosphère. Un autre coup de piston fait sortir encore $\frac{1}{11}$ de l'air restant; puis, en continuant ce jeu alternatif, on fait sortir à chaque coup $\frac{1}{11}$ du reste, puis $\frac{1}{11}$ du reste, et ainsi de suite. D'où l'on voit que jamais le vide ne se pourra faire, puisqu'en prenant la onzième partie d'une quantité et la onzième partie des restes successifs, on ne peut jamais parvenir à prendre cette quantité tout entière. Mais l'on parvient cependant à réduire l'air de la cloche à une élasticité de plus en plus faible, qui peut arriver à n'être plus que de 2 millimètres. La rapidité de l'opération dépend du rapport qui existe entre la capacité du corps de pompe et celle de la cloche. Ce rapport étant donné, on peut calculer facilement combien il faut de coups de piston pour réduire l'air à une tension donnée; et ensuite on peut, par la loi de Ma-

riotte, calculer le poids de l'air qui reste, quand on connaît le poids du volume primitif.

Pour compléter la machine pneumatique que nous venons de décrire et qui est en quelque sorte la machine réduite à ses plus simples éléments, on voit qu'il faut y ajouter un moyen de mesurer la pression de l'air qui reste dans la cloche, et un moyen de rendre l'air, sans quoi la cloche ne pourrait plus se séparer de la platine. On obtient ces deux résultats en adaptant à la machine l'*éprouvette* et la *clef*.

L'éprouvette *v* (Fig. 1) se compose d'un tube de verre courbé en U, et d'une petite cloche qui le contient. Le tube est représenté à part (Fig. 10); il est ouvert par un bout seulement; on le fixe sur une échelle divisée en millimètres, et la cloche sous laquelle on l'enferme est munie d'un robinet *r* (Fig. 1) au moyen duquel elle peut être mise en communication avec les conduits de la machine. Quand cette communication est établie, l'air se raréfie au même degré sous la cloche de la platine et dans la petite cloche de l'éprouvette. Le tube en U devient un baromètre à siphon, dont la branche ouverte est aussi longue que la branche fermée; alors dès que l'air est suffisamment raréfié, le baromètre descend, c'est-à-dire que le mercure baisse dans la branche fermée et s'élève dans la branche ouverte; la différence des niveaux mesure comme à l'ordinaire l'élasticité du gaz. Si l'on parvenait à faire complétement le vide, les deux sommets du mercure dans la branche fermée et dans la branche ouverte seraient exactement au même niveau (Fig. 10); si le premier s'élève de 1 millimètre au-dessus du second, le vide est fait à 1 millimètre, c'est-à-dire que l'élasticité du gaz restant est de 1 millimètre de mercure, etc.

On comprend que si le baromètre qui constitue l'éprouvette n'était pas absolument purgé d'air, le niveau du mercure de la branche fermée serait, lorsqu'on aurait fait le vide, plus bas que celui de la branche ouverte; et toutes les indications de l'éprouvette seraient fausses dès le commencement de l'expérience.

Au lieu de prendre pour éprouvette un baromètre complet, on prend ordinairement un *baromètre tronqué*, comme celui de la figure 1; mais les raisonnements que nous venons de faire s'y appliquent exactement, si ce n'est que, dans ce cas, l'éprouvette ne commence à descendre que quand l'élasticité de l'air de la cloche est moindre que la distance qu'il y a entre le som-

met de la branche fermée et le niveau du mercure dans la branche ouverte.

Lorsqu'on rend l'air, comme nous allons le voir, le mercure remonte vivement dans la branche fermée de l'éprouvette, et pour qu'il ne la brise pas en choquant le sommet avec trop de violence, on ménage vers le haut du tube un petit étranglement qui retarde la vitesse (Fig. 10).

La *clef* sert à rendre l'air, et en outre à établir ou supprimer la communication entre le corps de pompe et la cloche; elle se place en *y* (Fig. 1), et elle est représentée à part, un peu au-dessus de la cloche. C'est une sorte de robinet, qui se distingue des robinets ordinaires en ce qu'il n'a pas seulement une ouverture *transversale*, mais encore une ouverture *longitudinale*, partant de l'extrémité même et aboutissant sur la zone de la première. Cette ouverture se ferme par le bouchon conique *b*. Quand on veut garder le vide sous la cloche, on tourne la clef pour que l'ouverture transversale soit de haut en bas, et l'ouverture longitudinale du côté du corps de pompe. Toute communication est ainsi interceptée. Quand on veut rendre l'air, on fait faire à la clef une demi-révolution, on ôte le bouchon *b*, et l'air se précipite dans le conduit et dans la cloche.

La machine pneumatique, telle qu'elle était établie par Fortin, est représentée dans la figure 4; d'après ce que nous venons de dire, il suffit d'y jeter les yeux pour en comprendre la disposition. On remarquera seulement que du haut du conduit vertical qui porte la platine *p*, part un conduit horizontal qui communique avec un tube barométrique *t* plongeant par son extrémité inférieure dans la cuvette *v*. C'est ce tube qui sert d'éprouvette; dans des recherches délicates il doit être préféré à l'éprouvette ordinaire, dont nous avons parlé plus haut, parce qu'il est toujours à craindre qu'elle ne soit mal purgée d'air.

Les deux pistons à crémaillère mus par le mouvement de va-et-vient de la manivelle *m* offrent aussi un avantage : quand le vide est fait, pour soulever un piston de 1 décimètre de rayon, il faudrait faire un effort de $314 \times 1^k,033 = 324^k$; mais au moyen des deux pistons, rendus solidaires par le pignon qui engrène dans les deux crémaillères, cet effort disparaît, puisque l'un descend tandis que l'autre monte, et il ne reste plus à vaincre que les frottements.

On doit à M. Babinet un perfectionnement ingénieux, représenté dans la figure 3, qui permet de faire le vide à moins de 1 millimètre. Le robinet *r*, établi entre les deux corps de pompe et un peu au-dessous de leur fond, porte quatre ouvertures *s*, *t*, *v*, *u*. La première et la seconde vont de part en part, mais elles sont perpendiculaires entre elles; la troisième, *v*, ne traverse que la moitié du robinet, et la quatrième, *u*, qui est dans le sens de sa longueur, communique aux ouvertures *t* et *v*. Au fond du corps de pompe *a* se trouve un conduit courbe qui prend naissance au trou de la soupape conique, et qui aboutit en *b* et *c* dans le boisseau du robinet *r*; au fond du corps de pompe *d* se trouvent deux conduits, l'un qui part du trou de la surface conique et qui aboutit en *e*, l'autre qui part du fond du corps de pompe et qui aboutit en *g*. Dans la position que représente la figure, en soulevant le piston *a*, on fait le vide à la fois sous la cloche au moyen du conduit *ux*, et sous le piston *d*, au moyen du conduit *gsc*; par conséquent l'équilibre de tension s'établit entre le corps de pompe *d* et la cloche; mais, si l'on tourne le robinet *r* d'un quart de tour, les trous *c* et *g* se ferment, le conduit *t* se présente devant les ouvertures *b* et *e*, et la machine fonctionne comme à l'ordinaire. Ainsi, en donnant au robinet *r* la première position pendant que le piston de *a* se lève, et la deuxième pendant qu'il descend, on doit pousser le vide plus loin qu'on ne peut le faire avec une machine ordinaire.

La machine pneumatique fut inventée vers 1650, par Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg; elle fut, peu de temps après, changée et perfectionnée par un grand nombre de physiciens. Hook plaça le corps de pompe verticalement, Papin ajouta la platine, Hawksbée fit deux corps de pompe au lieu d'un, et ensuite les soupapes furent modifiées d'une infinité de manières.

Otto de Guericke fit avec sa machine l'expérience curieuse des *hémisphères de Magdebourg*, qui consiste à faire le vide dans un globe de métal dont les deux moitiés sont simplement juxtaposées. Avant que le vide soit fait, les deux *hémisphères* se séparent facilement; mais, quand il n'y a plus d'air intérieur pour balancer la pression extérieure, l'adhérence est si forte que toute la force d'un homme est insuffisante pour les séparer. En effet, si la section des hémisphères a seulement 1 décimètre

de rayon, ou environ 300 centimètres carrés de surface, la pression extérieure qui les unit équivaut à plus de 300 kilogrammes. On met une bande de cuir à la jonction des hémisphères pour favoriser le contact, et il y a un robinet qui s'ouvre pour faire le vide et qui se ferme pour empêcher la rentrée de l'air (Pl. 5, Fig. 17).

On se sert de la machine pneumatique pour faire une foule d'expériences sur les pressions et sur les propriétés des corps organiques ou inorganiques.

On démontre, par exemple, que les corps en combustion s'éteignent dans le vide ; que la fumée tombe comme une masse pesante ; qu'il y a de l'air en dissolution dans l'eau ; qu'il reste une couche d'air entre les liquides et les parois des vases qui les contiennent, car cette couche interposée se manifeste par une foule de petites bulles qui grossissent à mesure que la pression diminue ; que l'eau froide entre en ébullition ; que certains insectes vivent plusieurs jours dans le vide le plus parfait de la machine ; que les substances fermentescibles se conservent sans altération, etc., etc. C'est sur cette dernière propriété que repose le procédé d'Appert pour conserver les substances alimentaires. Ce procédé, exploité en grand dans la plupart des ports de France et d'Angleterre, rend les plus grands services à la marine : nous avons ouvert des boîtes préparées depuis seize ans, qui contenaient des aliments aussi frais que le premier jour.

81. Machine de compression. — La machine de compression (Fig. 2) est destinée à comprimer l'air. Elle se compose de deux corps de pompe pareils à ceux de la machine pneumatique ; la seule différence est dans les soupapes qui s'ouvrent en sens contraire, c'est-à-dire de *haut en bas.* Quand on abaisse le piston, il comprime l'air, et le fait passer dans le récipient ; quand on le relève, l'air extérieur ouvre la première soupape, et entre dans le corps de pompe, tandis que l'air comprimé du récipient presse la seconde soupape, et la tient fermée ; enfin, quand on rabaisse le piston, la première soupape se ferme, l'air se comprime de plus en plus, il devient capable d'ouvrir la seconde soupape, et passe encore dans le récipient ; et ainsi de suite.

L'éprouvette de la machine de compression est un tube droit *t*, fermé à son sommet, rempli d'air, et plongeant par son extré-

mité inférieure dans une cuvette de mercure *c*. Au commencement de l'expérience, l'air du tube est sous une pression atmosphérique, et le mercure est au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur; à mesure que la pression augmente, le mercure monte dans le tube, le volume de l'air se réduit successivement à la moitié, au tiers ou au quart de ce qu'il était; et d'après la loi de Mariotte, on juge qu'il est sous une pression de deux, trois ou quatre atmosphères. Dans le récipient, la pression de l'air est plus grande que dans le tube, de toute la hauteur de la colonne de mercure qui s'élève au-dessus du niveau extérieur.

82. Il y a des *pompes de compression* qui sont destinées à être vissées sur divers appareils pour y comprimer de l'air ou des gaz; alors, elles se composent simplement d'un corps de pompe et d'un piston sans soupape. La figure 11 représente l'une de ces dispositions; c'est un appareil avec lequel on peut faire en petit des eaux de Seltz : *v* est le réservoir, en grande partie rempli d'eau, où l'on doit refouler de l'acide carbonique; il porte en haut un robinet auquel tient un tube qui plonge presque au fond du réservoir; au-dessus du robinet est un pas de vis destiné à recevoir la pompe de compression. Le corps de cette pompe est muni, à sa partie inférieure, d'une soupape s'ouvrant de haut en bas, et latéralement d'une seconde soupape s'ouvrant de dehors en dedans. C'est ce tube latéral qui est mis en communication avec le réservoir de gaz, ou simplement avec une vessie qui en est successivement remplie. Quand le piston se lève, il aspire le gaz; quand il descend, il le comprime; et si la pompe est bien faite, il l'oblige à forcer la soupape du fond pour passer dans le réservoir inférieur.

83. Mesure des pressions des gaz contenus dans divers appareils. — On mesure en général les pressions des gaz par deux moyens; par le moyen des colonnes liquides, ou par le moyen des soupapes. Les appareils à colonne liquide s'appellent des *manomètres;* les soupapes s'appellent, en général, *soupapes de pression* et *soupapes de sûreté* quand elles sont destinées à empêcher les explosions.

Soupapes de pression. — Ces soupapes sont indéfiniment variables dans leurs formes et dans leurs dimensions : tantôt elles ont la forme d'un cône tronqué (Fig. 5, *a* et *c*); tantôt elles se posent sur les bords de l'ouverture par un plan annulaire très-étroit (Fig. 5, *b*). Dans tous les cas, elles doivent fermer

hermétiquement jusqu'à l'instant où elles sont soulevées. Pour estimer l'élasticité du gaz qui est capable de les soulever, il faut connaître deux choses : 1° le poids total qui charge la soupape; 2° l'étendue de la surface qui est exposée à la pression verticale du gaz. Supposons que le poids soit évalué en kilogrammes, et que l'étendue de la surface pressée soit évaluée en centimètres carrés : si le poids est, par exemple, de 100 kilogrammes, et la surface de 25 centimètres, chaque centimètre carré supportera 4 kilogrammes; donc, d'après ce que nous avons vu (69) le nombre des atmosphères est égal à $\frac{4}{1.033}$ ou à $3^{\text{atm}},87$, plus encore la pression atmosphérique ordinaire qui s'exerce aussi sur la soupape. Ce même moyen s'applique aux liquides comme aux gaz; c'est celui que l'on emploie pour essayer les tuyaux de conduite et les chaudières des machines à vapeur.

Si l'on représente en général par s la surface de la soupape contre laquelle s'exerce la pression, par p le poids qui la charge, en y comprenant son propre poids, la pression sur l'unité de surface est $\frac{p}{s}$, et le nombre des atmosphères est

$$\frac{p}{s \cdot 1^{k},033},$$

pourvu que p soit exprimé en kilogrammes, et s en centimètres carrés.

Quelquefois, au lieu d'exprimer cette pression en atmosphères, on peut avoir besoin de l'exprimer en colonne liquide; alors on y parvient par la formule (59)

$$\frac{p}{s} = h \cdot \varpi \cdot d, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{p}{s \cdot \varpi \cdot d}.$$

Si p est donné en kilogrammes et s en centimètres carrés, on aura $\varpi = 0^{k},001$, et la valeur de h sera exprimée en centimètres; d est toujours la densité du liquide par rapport à l'eau.

L'incertitude qu'il peut y avoir dans les déterminations de cete espèce résulte surtout des difficultés qui se présentent pour obtenir la véritable valeur de s. En effet, quand la soupape est conique, si elle est mal rodée, la surface qui reçoit la pression n'est pas celle de la petite base du cône, ni peut-être celle de la grande base, et l'on est obligé de prendre pour s une surface intermédiaire dont on détermine la grandeur un peu arbitrairement.

Quant à la valeur de p, elle s'obtient aisément si le poids est posé sur la soupape elle-même; mais si, comme il arrive souvent, son effort s'exerce à l'extrémité d'un levier (Fig. 5, *a* et *b*), il se détermine par cette proportion :

$$\frac{x}{p}=\frac{b}{b'},$$

b et b' étant les bras de levier du poids p et de la soupape, c'est-à-dire les perpendiculaires abaissées du point fixe sur la verticale du point d'attache du poids, et sur la verticale du point qui presse sur la tête de la soupape.

Manomètres. — Le nom de manomètre avait été donné par Varignon à un appareil qu'il destinait à mesurer la raréfaction de l'air. Maintenant, on appelle *manomètre* tout appareil à colonne liquide propre à mesurer des pressions. Le baromètre mesure la pression libre de l'atmosphère, le *manomètre* mesure la pression des fluides contenus dans les espaces fermés. L'éprouvette de la machine pneumatique et celle de la machine de compression sont de véritables manomètres. Cependant on peut établir quelques distinctions dans les appareils de cette espèce.

La figure 19 représente un manomètre au moyen duquel on mesure la tension des gaz contenus dans le ballon *b*. Il a été employé par de Saussure, et ensuite par Berthollet, dans les recherches importantes qu'ils ont faites l'un et l'autre sur la végétation et sur les phénomènes des corps vivants. Les animaux et les plantes étaient renfermés dans le ballon *b*.

Les *tubes de sûreté* sont des manomètres qui indiquent la tension des gaz contenus dans les appareils auxquels ils sont adaptés. Quand la tension est égale à la pression atmosphérique, le liquide est au même niveau dans les deux branches (Fig. 9); et, en général, la différence des niveaux mesure la différence des pressions; il suffit de connaître la densité du liquide contenu dans le tube pour évaluer cette différence de pression en millimètres de mercure.

Les tubes de sûreté ont été inventés par Welter : ils sont d'un grand usage en chimie, parce qu'ils empêchent les *explosions* et l'*absorption*. Quand la pression intérieure devient trop faible, l'air atmosphérique refoule le liquide dans la boule et pénètre dans l'appareil; au contraire, quand elle est trop forte, elle chasse la colonne liquide et trouve une issue par le tube.

Quand les pressions doivent être très-fortes, on emploie d'autres manomètres (voy. chap. IV, machines à vapeur).

84. **Fusil à vent** (Fig. 12, 13, 14, 15). — Il suffit de nommer cet appareil pour que l'on en devine le mécanisme. La crosse contient un réservoir à soupape dans lequel on comprime de l'air sous huit ou dix atmosphères, au moyen de la pompe représentée dans la figure 15; cette pompe de compression est un simple tube à piston qui se visse sur le réservoir, et qui porte vers l'extrémité opposée un ou deux trous *a*, que le piston ferme dès qu'il commence à se rapprocher du fond. En mettant les pieds sur la traverse de la tige du piston, la manœuvre est facile; c'est par la résistance que le piston éprouve quand il approche du fond que l'on apprécie le degré de tension avec lequel l'air intérieur repousse la soupape. Quand le réservoir est chargé, on y ajoute un canon qui reçoit le projectile et qui en dirige le mouvement. On fait partir une détente qui presse la soupape : l'air sort avec violence, chasse la balle, et la soupape se referme à l'instant. On peut tirer de suite plus ou moins de coups, suivant que le réservoir est plus ou moins grand. Le fusil à vent peut lancer la balle avec autant de vitesse que le fusil à poudre. Cet effet ne se produit pas sans bruit ni sans lumière. L'air comprimé, se débandant subitement, fait une explosion pareille à celle du crève-vessie; et, à l'extrémité du canon, on voit un jet de flamme qui est produit par le frottement des petites poussières solides que l'air rencontre ou qu'il emporte avec lui, car il paraît que dans un air très-pur il n'y a plus de flamme perceptible.

CHAPITRE VII.

De l'Equilibre des Corps flottants et des Corps plongés dans les fluides.

85. On voit des corps pesants qui se meuvent en sens contraire de la pesanteur : le liége, le bois et beaucoup d'autres corps remontent quand ils sont plongés dans l'eau ; le fer remonte de la même manière, quand il est plongé dans le mercure ; la fumée s'élève dans l'air ; les nuages restent suspendus dans l'atmosphère, à peu près comme les vaisseaux restent flottants à la surface des eaux. Tous ces phénomènes, ainsi que ceux de l'aérostatique et de l'ascension des ballons, dépendent d'un seul principe, que l'on appelle le *principe d'Archimède*, parce qu'Archimède en est l'inventeur. A l'occasion de cette découverte, il fut, dit-on, saisi d'une si grande joie, qu'il sortit du bain, et parcourut les rues de Syracuse, en s'écriant : *Je l'ai trouvé, je l'ai trouvé*.

86. Le *principe d'Archimède* peut être énoncé de la manière suivante : *un corps plongé dans un fluide y perd une partie de son poids égale au poids du fluide qu'il déplace.*

Pour prendre une première idée de ce principe général, concevons un grand vase rempli d'eau, et, dans l'eau, un cube dont la face supérieure et la face inférieure soient horizontales. Il est évident, d'après les principes d'hydrostatique : 1° que les pressions latérales sont égales et contraires, et qu'elles se détruisent l'une l'autre ; 2° que la face supérieure supporte de *haut en bas* une pression égale au poids de la colonne liquide qui repose sur elle ; 3° que la face inférieure supporte de *bas en haut* une pression égale au poids de la colonne liquide qui reposerait sur elle, si le cube était lui-même de l'eau. Cette seconde pression l'emporte, sur la première, de tout le poids de la colonne liquide que déplace le cube ; donc le cube est repoussé en haut avec une force égale à cet excès de pression ; donc enfin il perd une partie de son poids égale au poids du volume liquide qu'il déplace. La pression de bas en haut, diminuée de la pression de haut en bas, est ce que l'on appelle la *poussée du fluide*. Ainsi,

un corps plongé est soumis à deux forces contraires : à son poids, qui tend à le faire descendre, et à la poussée du fluide, qui tend à le faire remonter. Si ces deux forces sont égales, le corps reste en équilibre; il a perdu tout son poids. Si la poussée du fluide est la plus grande, le corps est repoussé jusqu'à la surface. Enfin, si elle est la plus faible, le corps tombe au fond du vase. Cette proposition peut se démontrer directement au moyen de la *balance hydrostatique*, qui n'est autre chose qu'une balance ordinaire, destinée à peser les corps, d'abord en les laissant dans l'air, et ensuite en les plongeant dans un fluide. *c* (Pl. 5, Fig. 18) est un cylindre creux de cuivre, dont le cylindre massif *p* peut remplir exactement la capacité; on les met ensemble dans l'un des bassins de la balance, en les suspendant par des crochets, le cylindre massif en dessous; et, dans l'autre bassin, on met des poids *d* pour établir l'équilibre. Cela fait, on met la balance au repos, puis, au moyen de deux boutons *b* et *b'* adaptés au pied de la balance, et d'une crémaillère intérieure, on fait descendre le fléau et tout le système jusqu'à ce que le cylindre massif *p* plonge en totalité dans le vase d'eau *v*, qui est préparé au-dessous. Alors, en rendant au fléau sa liberté, on voit qu'il n'y a plus équilibre entre les deux bassins; le cylindre massif n'est plus assez lourd, il a perdu de son poids en plongeant dans le liquide. Pour montrer maintenant qu'il en a perdu une partie justement égale au poids du liquide qu'il déplace, on verse de l'eau dans le cylindre creux qui en contient juste autant qu'il y en a de déplacée, et l'équilibre se trouve en effet parfaitement rétabli.

Voici une autre démonstration du principe d'Archimède qui est tout à fait indépendante de la forme du corps plongé.

Dans l'intérieur de la masse fluide, concevons un volume quelconque, une sphère, par exemple, qui ait un mètre de rayon. Imaginons que les molécules d'eau, qui sont actuellement comprises dans ce volume, soient congelées pour un moment, c'est-à-dire qu'elles forment une sphère solide au lieu d'une sphère liquide; mais que, dans l'acte de la congélation, elles ne soient ni éloignées, ni rapprochées l'une de l'autre, et qu'elles conservent exactement leurs positions et leurs distances. Il est évident que la sphère solide qui en résulte restera suspendue et en repos, comme faisait la sphère liquide; car l'adhérence que nous venons d'établir entre les diverses molécules ne

peut ni les soutenir ni les faire tomber, elle ne change rien aux pressions ni à la pesanteur. Cette sphère solide et pesante a donc perdu son poids, puisqu'elle ne tombe pas, et elle l'a perdu parce qu'elle est environnée d'un fluide qui la presse de toutes parts. Donc, de l'ensemble des pressions inégales qui s'exercent en tous les points de sa surface, résulte une force unique, agissant de bas en haut, et précisément égale au poids de la sphère entière; ce raisonnement s'applique à un corps de forme quelconque.

Or, quelle que soit la forme du corps qui se congèle, comme nous le supposons, une fois qu'il est congelé, on pourrait le tourner d'une manière quelconque autour de son centre de gravité, et, dans toutes les positions, il resterait en équilibre. Donc la force de bas en haut, ou la *poussée du fluide*, est une force qui a son point d'application au centre de gravité du fluide congelé; ce point s'appelle le *centre de pression.*

Si, au lieu de la substance fluide elle-même que nous supposons congelée, nous imaginons maintenant dans l'intérieur du fluide un corps étranger de substance quelconque, de liége, de marbre ou de fer, il est évident qu'il supportera de la part du fluide environnant les mêmes pressions qu'une masse congelée qui aurait la même forme que lui. Donc la poussée du fluide et le centre de pression ne dépendent que de la quantité et de la forme du liquide déplacé, sans dépendre en aucune manière de la substance qui déplace le liquide.

Ainsi, un corps plongé dans un fluide est toujours soumis à deux forces dont nous connaissons maintenant les grandeurs, les directions et les points d'application : la première de ces forces est le poids du corps, qui agit de haut en bas, et qui est appliqué au centre de gravité de sa masse; la seconde est la poussée du fluide, qui agit de bas en haut, et qui est appliquée au centre de gravité du fluide déplacé : de là résultent des conditions d'équilibre et des conditions de stabilité ou d'instabilité, que nous allons déterminer.

87. Conditions d'équilibre des corps plongés. — Il y a deux conditions qui doivent être remplies, pour qu'un corps soit en équilibre au milieu d'un fluide; il faut : 1° que le poids du corps soit égal au poids du fluide déplacé; 2° que le centre de gravité du corps et celui du fluide déplacé se trouvent sur une même verticale. Ces conditions se déduisent de ce qui pré-

cède, mais nous pouvons les rendre encore plus sensibles par un exemple : *lspn* (Fig. 20, *a*) est une sphère composée de deux parties; l'une, *lsn*, qui est de liége, et l'autre, *spn*, qui est de plomb. Son centre de gravité est en *g*, et son poids est précisément égal au poids de l'eau qu'elle peut déplacer. Si on l'ajuste dans l'eau de manière que la section *sn* soit verticale (Fig. 20, *b*), elle sera soumise à deux forces parallèles, égales et contraires, qui formeront un couple, savoir, à son poids *pv*, et à la poussée du fluide *cf*; et l'équilibre n'aura lieu que quand le couple sera déployé comme dans la figure *a*, ou reployé sur lui-même comme dans la figure *c*. Dans le premier cas l'équilibre est stable, et il est instable dans le second.

Quand le corps est homogène, son centre de gravité coïncide avec le centre de pression, et la première condition d'équilibre est alors la seule nécessaire. On peut même l'exprimer autrement en disant que le corps et le fluide qui l'entoure doivent avoir la même densité. Une boule de cire reste suspendue au milieu de l'eau; elle tombe dans l'alcool, et elle nage sur le mercure, parce que sa densité est à peu près égale à celle de l'eau, plus grande que celle de l'alcool, et beaucoup moindre que celle du mercure.

Les poissons paraissent être en équilibre dans l'eau où ils vivent, car ils peuvent s'y tenir en repos sans être entraînés par leur poids ni rejetés par la poussée du fluide. Ainsi un poisson pèse précisément autant que l'eau qu'il déplace; il pèse 1 kilogramme s'il déplace un litre, et 1000 kilogrammes s'il déplace 1000 litres ou 1 mètre cube. Une baleine de 20 mètres de long déplace à peu près 500 mètres cubes, et pèse en conséquence 500 000 kilogrammes; et même un peu plus, à cause que l'eau de mer est un peu plus pesante que l'eau douce.

S'il est nécessaire que les poissons soient en équilibre pour n'être pas condamnés à se soutenir par un mouvement continuel au-dessus des profondeurs de la mer, il est nécessaire aussi que leur équilibre ne soit ni instable ni indifférent; et cette condition est remplie par un organe particulier qui sert aussi à d'autres usages, car dans l'organisation des êtres il n'y a pas une pièce qui n'ait qu'une seule fin. Cet organe est la vessie natatoire. Il a diverses formes dans les différentes espèces, mais il est toujours placé pour alléger les parties supérieures et pour laisser plus de poids aux parties inférieures. De cette manière, le

centre de gravité du corps est plus bas que le centre de pression, et la condition de stabilité se trouve remplie. D'après les observations curieuses de M. Biot, le gaz de la vessie natatoire n'est pas de l'air atmosphérique : il est de l'azote presque pur dans les individus qui vivent près de la surface, et il se compose de près de 0,9 d'oxygène et de 0,1 d'azote dans ceux qui vivent à des profondeurs de 1000 à 1200 mètres. A 8 ou 9000 mètres de profondeur, ces gaz seraient aussi denses que l'eau, et les vessies natatoires deviendraient inutiles pour l'équilibre.

Il paraît que les poissons se servent aussi de leur vessie natatoire pour exécuter des mouvements de haut en bas ou de bas en haut, qu'ils n'exécuteraient que difficilement au moyen de leurs nageoires. Il suffit pour cela qu'ils puissent la resserrer ou la gonfler à volonté : dans le premier cas, leur poids restant le même et leur volume devenant moindre, ils sont plus denses que l'eau, et ils tombent ; au contraire, dans le second cas, ils montent comme du liége.

Cependant ce phénomène n'est pas aussi simple qu'on l'imagine au premier instant. Un poisson au milieu de l'eau ne peut pas se gonfler comme un mammifère qui retient son haleine ; il ne trouve pas de l'air à prendre ou à rejeter; c'est avec la même quantité de gaz qu'il doit opérer ces mouvements. Il faut donc que, par une action volontaire, le gaz soit sans cesse plus comprimé qu'il ne le serait par le fluide environnant, et qu'un peu plus ou un peu moins d'énergie dans cette action comprimante lui donne successivement un moindre ou un plus grand volume.

Cet effet est rendu sensible par l'appareil de la figure 16, qui s'appelle un *ludion*. Le ludion *l* monte ou descend, suivant que l'on soulève ou que l'on presse la membrane *ab*, qui ferme le vase, parce que l'air qu'il contient reçoit une pression du liquide environnant, au moyen d'une petite ouverture *v*; quand on presse la membrane *ab*, tout le liquide du vase se comprime un peu plus, il entre dans le ludion, et réduit le volume de l'air; au contraire, quand on soulève la membrane, le liquide est moins comprimé; la force expansive de l'air du ludion refoule le liquide, le fait sortir en partie par l'ouverture *v*; l'air prend plus de volume, et le ludion monte parce qu'il devient plus léger.

Dans les poissons que l'on pêche à une profondeur de mille mètres, le gaz de la vessie natatoire est sous une pression

d'eau équivalente à cent atmosphères; arrivé à la surface, il tend à prendre un volume cent fois plus grand : aussi observe-t-on que tout l'effort musculaire ne suffit plus pour le retenir; il s'échappe en refoulant tous les organes voisins, et surtout la membranne de l'estomac, qui est alors tellement tendue et dilatée, qu'elle vient former au dehors de la gueule une espèce de ballon fort singulier. On peut juger par là que les régions de la mer ont leurs peuples différents, non-seulement suivant les climats, mais encore suivant les profondeurs.

88. **Conditions d'équilibre des corps flottants.** — Il y a deux conditions d'équilibre pour les corps flottants comme pour les corps plongés, et ces conditions sont les mêmes : seulement, la condition de stabilité est différente. Un vaisseau, par exemple, qui pèse un million de kilogrammes, n'est en équilibre que quand il déplace mille mètres cubes d'eau, qui pèsent comme lui un million de kilogrammes, et quand son centre de gravité et le centre de pression de l'eau se trouvent dans la même verticale. Mais, pour la stabilité, il n'est point nécessaire que le centre de gravité se trouve au-dessous du centre de pression; il suffit seulement qu'il se trouve au-dessous d'un autre point que l'on appelle le *métacentre* et dont la détermination appartient à la mécanique. La position du métacentre dépend de la forme du vaisseau; celle du centre de gravité dépend de la distribution de la charge, et c'est de leur distance relative que dépend la rapidité des oscillations. C'est pour cette raison, et pour beaucoup d'autres encore, que, dans le chargement des vaisseaux, il y a un art particulier à distribuer convenablement les poids.

89. **Des aérostats.** — Le principe d'Archimède est vrai pour les gaz comme pour les liquides. Les corps plongés dans les gaz y perdent une partie de leur poids égale au poids du volume de gaz qu'ils déplacent. Si l'air atmosphérique était très-pesant, s'il pesait, par exemple, deux ou trois fois autant que l'eau, la plupart des corps terrestres seraient soulevés par la poussée de ce fluide; et nous-mêmes, nous serions emportés dans l'air comme le liége est emporté dans l'eau. Mais l'air est si léger, il fait perdre aux corps si peu de leur poids, qu'il fallait une grande hardiesse de génie pour concevoir la possibilité de s'élever dans l'atmosphère, de s'y soutenir en équilibre, et d'y voguer librement comme on vogue sur la mer.

C'est aux frères Montgolfier que nous devons cette merveilleuse découverte. Ils avaient annoncé qu'une grande machine de leur invention serait capable de parcourir l'atmosphère : l'expérience en fut tentée à Annonay le 5 juin 1783, en présence des états généraux et d'un concours immense de peuple ; c'est alors que l'on vit en effet un spectacle nouveau sur la terre, et bien digne d'exciter l'enthousiasme : un globe immense qui s'élevait majestueusement dans les airs, et qui semblait s'y soutenir par quelque puissance invisible. Cette espèce de prodige est cependant bien facile à comprendre. La *montgolfière*, car c'est ainsi qu'on appelle les appareils de cette nature, la montgolfière se compose d'un globe de papier verni ou de taffetas, qui porte à sa partie inférieure une ouverture de quelques décimètres carrés. Au-dessous de cette ouverture, et à quelque distance, est suspendu un panier léger, en fil de métal, contenant un corps combustible, soit de la paille hachée, soit de la laine ou du papier, ou une éponge imbibée d'alcool. Ce combustible étant enflammé, l'air qu'il échauffe monte de lui-même, pénètre dans le globe, et en remplit bientôt toute la capacité. A volume égal, l'air chaud pèse moins que l'air froid; ainsi le poids du globe est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, et il doit s'élever, par l'excès d'énergie de la poussée du fluide : il s'élève, emportant avec lui le combustible enflammé qui produit sa puissance ascensionnelle, et, pour qu'il s'arrête, il faut qu'il arrive dans des couches d'air assez raréfiées pour que la différence des poids de l'air froid déplacé et de l'air chaud intérieur soit justement égale au poids de l'enveloppe, du panier, et du combustible qu'il contient.

Un physicien célèbre, Charles, jeune alors, et professeur à Paris, eut l'heureuse idée de remplacer l'air chaud par le gaz inflammable, que l'on appelle aujourd'hui l'*hydrogène*, dont Cavendish avait fait connaître l'extrême légèreté dès l'année 1766. L'hydrogène est plus de quatorze fois plus léger que l'air, car sa densité est 0,0691, en prenant celle de l'air pour unité. Un centimètre cube d'air pèse $0^{k},001299$, et $1000^{m.c}$ pèsent 1299^{k}, tandis que $1000^{m.c}$ d'hydrogène ne pèsent que $89^{k},760$. La différence est 1209^{k}. Ainsi, un globe de mille mètres cubes, rempli d'hydrogène, peut enlever un poids de 1209^{k}. Un globe de 500 mètres cubes ne pourrait enlever que 604^{k}. C'est un *ballon* de cette grandeur que Charles fit construire; et, pour

montrer la confiance que devait inspirer sa découverte, il entreprit, avec Robert, ce fameux voyage dans lequel il fut porté en quelques minutes à la hauteur de plus de 1000 mètres, et parcourut, dans cette région de l'atmosphère, plus de neuf lieues dans l'espace de deux heures. C'est du milieu des Tuileries que Charles fit son assension ; toute la population de Paris était en mouvement; les places publiques, les sommets des édifices, et tous les lieux élevés étaient couverts de spectateurs : un coup de canon fut le signal du départ, et bientôt on vit monter le ballon, comme un météore qui s'élève sur l'horizon ; au plus haut des airs, on distinguait encore les banderoles flottantes, éclairées par le soleil, et les navigateurs tranquilles qui saluaient la terre. Jamais une expérience de physique n'excita tant d'admiration et un tel concert d'applaudissements.

Charles ne pouvait manquer d'avoir des imitateurs, et il en eut en effet dans tous les pays savants. Mais entre tous les voyages aérostatiques qui furent entrepris pour des recherches scientifiques, on distingue ceux qui furent exécutés en France, en 1804, par MM. Gay-Lussac et Biot. Dans une première ascension, ces deux physiciens, parvenus à la hauteur de 4000 mètres, firent des expériences importantes sur l'état électrique et sur la température de ces hautes régions. Dans une seconde ascension, Gay-Lussac, seul, s'éleva à la hauteur de 7000 mètres, la plus grande à laquelle l'homme soit jamais parvenu. MM. de Humboldt et Bonpland se sont élevés à 6100 mètres sur le Chimboraço au-dessus du volcan de Cotopaxi. A cette grande hauteur on éprouve un froid très-vif; le thermomètre de Gay-Lussac descendit à 10° au-dessous de glace, tandis qu'à la surface de la terre il marquait 30° de chaleur. La sécheresse de l'air est si grande, et les corps hygrométriques perdent si rapidement leur humidité, qu'on les voit se distordre et se tourmenter dans tous les sens. Le ciel paraît d'un bleu très-foncé et mêlé d'une teinte noire. Suspendu au milieu de ces espaces, dans un air si raréfié, à une grande distance de la terre et de tous les corps résistants, aucun bruit ne vient frapper l'oreille, aucun objet ne se présente à la vue, et l'on éprouve alors un sentiment de solitude dont on ne peut ici-bas se faire une juste idée.

MM. Barral et Bixio, dans un ballon de très-grandes dimensions, se sont élevés aussi à la hauteur de 7000 mètres,

le 27 juillet 1850. Ils avaient le dessein de monter beaucoup plus haut, mais ils en ont été empêchés; une large déchirure survenue à la partie inférieure du ballon, diminuait la force ascensionnelle et mettait leur vie en péril; ce n'est que par d'habiles manœuvres qu'ils ont pu, sains et saufs, regagner la terre à dix-huit kilomètres de Paris. Parmi les curieuses observations dont ils ont enrichi la science, nous citerons ici le froid extraordinaire de 40° au-dessous de zéro qu'ils ont éprouvé à cette hauteur de 7000 mètres, où Gay-Lussac, à peu près dans la même saison, n'avait observé que 10° au-dessous de zéro.

CHAPITRE VIII.

Principes d'Hydrodynamique.

L'hydrodynamique, considérée d'une manière générale, embrasse tout ce qui est relatif au mouvement des fluides, et forme par conséquent l'une des branches les plus importantes de la mécanique rationnelle. Mais, dans quelques cas particuliers, les mouvements des liquides sont soumis à des lois assez simples pour être directement vérifiées par l'expérience, et c'est sous le point de vue purement expérimental que nous allons indiquer les principes de l'hydrodynamique et la construction de quelques machines qui en dépendent.

90. **Condition de l'écoulement des liquides, et théorème de Torricelli.** — Les parois des vases qui contiennent des liquides supportent généralement deux pressions opposées (Pl. 6, Fig. 5) : l'une, qui s'exerce de dedans en dehors, et qui repousse la paroi; l'autre, qui s'exerce de dehors en dedans, et qui tend à l'enfoncer. La première est la somme des pressions dues à la colonne liquide qui s'élève au-dessus du point de la paroi que l'on considère, et au poids que cette colonne elle-même peut supporter à son sommet; la seconde est la pression atmosphérique, ou, plus généralement, la pression du milieu qui enveloppe le vase. Lorsqu'on perce une ouverture, soit dans le fond, soit dans la paroi latérale, le liquide contenu dans cette ouverture supporte la même pression que la paroi dont il tient la place; par conséquent, la seule condition nécessaire pour qu'il s'écoule, c'est que la pression intérieure, qui tend à produire l'écoulement, soit plus grande que la pression extérieure, qui tend à l'empêcher. Cette vérité peut, au reste, se démontrer par l'expérience suivante. Une éprouvette (Fig. 1) étant remplie d'eau, on en recouvre l'ouverture avec un disque de papier, on la retourne, et la colonne liquide reste suspendue, parce que la pression de haut en bas, qui est due au poids du liquide, est moindre que la pression de bas en haut qui est due à l'atmosphère. Si l'ouverture de l'éprouvette n'avait que

2 ou 3 millimètres de diamètre, le disque de papier ne serait point nécessaire : mais, pour des ouvertures plus grandes, le disque de papier empêche que la colonne ne se *divise*, c'est-à-dire que l'eau ne coule d'un côté, tandis que l'air monte de l'autre.

Lorsque le liquide s'écoule d'un orifice en vertu de l'excès de pression dont nous venons de parler, la *dépense*, c'est-à-dire le volume qui s'échappe dans un temps donné, dépend évidemment de la section de l'orifice et de la vitesse dont les molécules liquides sont animées au moment où elles la traversent. Cette vitesse dépend à son tour de la densité du liquide, de l'excès de pression qui s'exerce à l'orifice, et du frottement que le liquide peut éprouver, soit contre les parois du vase, soit contre les bords de l'orifice. Pour diminuer le frottement, qui n'est ici qu'une force perturbatrice, on cherche d'abord les lois de l'écoulement par des orifices en *minces parois*, c'est-à-dire par des orifices percés dans des plaques très-minces, et ajustés à des vases de grande dimension, afin que le liquide n'ait qu'une très-petite vitesse contre les parois du vase lui-même.

Sous ces conditions, les lois de l'écoulement sont comprises dans le théorème suivant, qui est connu sous le nom de théorème de Torricelli : *Les molécules, en sortant de l'orifice, ont la même vitesse que si elles étaient tombées librement dans le vide, d'une hauteur égale à la hauteur du niveau, au-dessus du centre de l'orifice.* Nous verrons, dans un instant, comment l'expérience peut vérifier cette loi fondamentale, et comment elle peut vérifier aussi les trois conséquences suivantes qui s'en déduisent.

Premièrement. *La vitesse d'écoulement ne dépend que de la profondeur de l'orifice au-dessous du niveau, et nullement de la nature du liquide;* car tous les corps, en tombant de la même hauteur dans le vide, acquièrent la même vitesse. Ainsi, le mercure et l'eau prennent la même vitesse lorsqu'ils s'écoulent par des orifices qui sont à la même profondeur au-dessous du niveau. Cependant le mercure est poussé par une pression bien plus grande que l'eau. La profondeur de l'orifice étant, par exemple, de 10^{m},30, l'eau ne serait poussée que par la pression d'une atmosphère, tandis que le mercure serait poussé par une pression de 13 atmosphères et demie.

Secondement. *Pour un même liquide, les vitesses d'écoulement sont comme les racines carrées des profondeurs des ori-*

fices au-dessous du niveau; car les vitesses des corps pesants sont entre elles comme les racines carrées des hauteurs de chute. Ainsi, dans un vase qui aurait, par exemple, 100 mètres de hauteur, si l'on perçait deux orifices, l'un à 1 mètre de profondeur, et l'autre sur le fond à 100 mètres de profondeur, la vitesse du liquide sortant par le dernier serait dix fois plus grande seulement que la vitesse du liquide sortant par le premier. Cependant la seconde pression serait 100 fois plus grande que la première.

Troisièmement. Si la pression qui s'exerce au sommet de la colonne liquide était plus grande que la pression extérieure qui s'oppose à l'écoulement, cet excès de pression serait équivalent au poids d'une colonne de *même* liquide d'une certaine hauteur; et alors la vitesse des molécules qui s'écoulent serait la même que si elles étaient tombées du sommet de cette seconde colonne qu'il faut concevoir comme ajoutée au-dessus de la première. Ce serait le contraire si la pression extérieure était plus grande que la pression qui s'exerce au-dessus du liquide.

91. **Divers moyens d'obtenir une pression constante.** — Pour vérifier les lois précédentes d'une manière simple et rigoureuse, il est nécessaire d'obtenir une vitesse constante à l'orifice, et par conséquent de maintenir une pression constante sur le liquide qui s'écoule. On y parvient de plusieurs manières, mais nous indiquerons seulement les trois procédés suivants : le *trop-plein*, le *flotteur de Prony*, et le *vase de Mariotte*.

Trop-plein (Fig. 2). — *r* est un réservoir alimentaire, *s* une soupape, *t* un tube, *c* une caisse percée de petits trous, *d* un déversoir, *v* le vase dans lequel se fait l'écoulement, et *o* l'orifice. Par la soupape *s*, qui se lève plus ou moins, on fait arriver dans le vase *v* un peu plus d'eau qu'il ne s'en écoule par l'orifice *o*; le déversoir *d* sert à évacuer l'excédant, le tube *t* et sa caisse *c* sont destinés à empêcher l'agitation que pourrait produire l'eau par sa chute; car les plus légers mouvements, même à la surface supérieure, peuvent avoir une influence sur la vitesse à l'orifice.

Flotteur de Prony (Fig. 6).—Cet appareil se compose d'un vase d'écoulement *v*, d'une caisse flottante *c*, d'une caisse inférieure *c'*, de diverses tringles *t* qui réunissent les deux caisses; et d'un entonnoir *n* destiné à conduire dans la caisse inférieure tout le liquide qui s'échappe de l'orifice *o*. Si l'on prend dans le vase *v*, par exemple, 10 litres d'eau, et qu'on les verse dans la

caisse *c*, le niveau ne sera pas changé dans le vase *v*, car la caisse, étant devenue plus pesante de 10 kilogrammes, déplace, de plus, 10 litres d'eau dans le vase *v*. Ainsi l'addition de l'eau dans la caisse fait remonter le niveau autant que la soustraction de l'eau dans le vase le fait baisser : mais, si l'on ajoute l'eau dans la caisse inférieure *c'*, on obtiendra le même résultat, puisqu'on produira une même augmentation de poids dans le système; donc, pour obtenir un niveau constant pendant l'écoulement, il suffit d'ajouter au-devant de l'orifice *o* un entonnoir *n* qui amène dans la caisse *c'* tout le liquide qui s'écoule par l'orifice *o*.

Vase de Mariotte. — Cet appareil est représenté (Fig. 7, 8). *t* est un tube qui peut glisser dans le bouchon de la tubulure *b*, et dont l'extrémité inférieure est successivement ou abaissée au point *p*, au-dessous du niveau *nv* de l'ouverture latérale ou relevée au point *h*, au-dessus du même niveau. L'ouverture latérale est assez étroite pour que la colonne liquide ne puisse pas se diviser. Le tube étant en *p* (Fig. 7), et complétement rempli d'eau, ainsi que le flacon, il est clair que le liquide doit s'écouler par l'orifice latéral *v*, car la pression intérieure se compose de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube, et de la pression due au poids de la colonne liquide *sn*, tandis que la pression extérieure n'est que la pression atmosphérique. Le liquide jaillit en effet, et le niveau tombe rapidement dans l'intérieur du tube depuis le point *s* au point *n*; là, il s'arrête, et tout écoulement cesse. Le vase reste plein, l'orifice *v* reste ouvert, et cependant pas une goutte de liquide ne s'échappe. Sur toute l'étendue de la couche horizontale *n'nv*, la pression étant la même qu'au point *n*, c'est-à-dire une pression atmosphérique, il n'y a plus de raison pour que le liquide s'écoule. Sur une autre couche, telle que *c'c*, la pression n'est pas due seulement au poids de la colonne supérieure, mais elle est égale à une pression atmosphérique diminuée de la colonne *c'n'*. Que l'on fasse maintenant glisser le tube pour le remonter jusqu'au point *h*, à l'instant même l'écoulement recommence, les bulles d'air se forment à l'extrémité inférieure du tube, se gonflent, se détachent, et montent à la file dans la partie supérieure du vase. L'écoulement continue de la sorte, avec une *vitesse constante*, pendant tout le temps que le niveau du liquide descend depuis le sommet du vase jusqu'en *h*; car la pression sur la couche *n'nv* se compose alors de la pression atmosphérique qui s'exerce en *h*,

et de la pression qui est due au poids de la colonne hn, pressions qui restent l'une et l'autre constantes aussi longtemps que le niveau n'est pas tombé jusqu'en h. A partir de cet instant, la vitesse d'écoulement diminue de plus en plus, jusqu'à devenir tout à fait nulle, quand le niveau est arrivé au point n. Le vase de Mariotte peut être présenté sous une grande variété de formes, soit avec un orifice latéral pour l'écoulement, soit avec un orifice horizontal, comme l'indique la figure 9.

92. Vérification expérimentale du théorème de Torricelli. — La vitesse v des molécules qui sont tombées librement dans le vide, d'une hauteur h, est exprimée par la formule

$$v = \sqrt{2gh}$$

qui se déduit des formules générales du mouvement des corps pesants (**40**). Nous avons vu d'ailleurs (**50**) qu'à Paris on a $g = 9^{m},8088$. Ainsi

$$v = 4^{m},429\sqrt{h}.$$

Telle est donc, suivant le théorème de Torricelli, la vitesse que doivent prendre les molécules liquides au moment où elles traversent un orifice dont le centre est situé à une profondeur h au-dessous du niveau, h étant exprimé en mètres. C'est ce que l'on appelle la *vitesse théorique*. Pour vérifier ce résultat, il suffit donc de disposer un appareil à niveau constant, d'où le liquide s'écoule par un orifice en mince paroi d'une section connue s, et dont le centre soit à une profondeur connue h au-dessous du niveau, puis d'observer la dépense ou le nombre des litres qui s'écoulent dans un temps déterminé, par exemple, dans $8'$ ou $10'$. Alors il est facile d'en déduire la dépense d en $1''$, exprimée en mètres cubes. Cette dépense, ou plutôt ce volume, peut être considéré comme un cylindre qui est passé à l'orifice à peu près comme un fil passe à la filière. En désignant donc par v' la longueur inconnue de ce cylindre, on doit avoir

$$sv' = d \quad \text{ou} \quad v' = \frac{d}{s},$$

la section s de l'orifice étant aussi exprimée en mètres carrés; et il est évident que v' représente la *vitesse effective* des molécules liquides, puisqu'il représente le nombre des mètres que ces molécules parcourent réellement en $1''$.

Il est donc facile de voir si la vitesse effective donnée par la formule

$$v' = \frac{d}{s}$$

est égale à la vitesse théorique donnée par la formule

$$v = 4^{m},429\sqrt{h}.$$

Des expériences comparatives sur ce sujet ont été faites par un très-grand nombre d'observateurs, et tous les résultats conduisent à cette conséquence, qu'à l'orifice même la vitesse effective est seulement les deux tiers environ de la vitesse théorique. Ainsi le théorème de Torricelli, fondé d'ailleurs sur des considérations mécaniques très-simples, semblerait, au premier abord, n'être pas confirmé par l'expérience. Mais l'on parvient cependant à concilier les résultats : il suffit, pour cela, de tenir compte de la *contraction de la veine fluide.* On observe, en effet, que la veine se contracte à partir du moment où elle sort de l'orifice, c'est-à-dire que sa section diminue rapidement; si bien qu'à une distance égale à peu près au diamètre de l'orifice, sa section n'est plus que les deux tiers environ de la section de l'orifice lui-même. On a cru longtemps qu'au delà de cette limite la veine reprenait une section plus grande, et qu'elle avait par conséquent un *maximum de contraction;* mais Savart a démontré (*Annal. de Chim. et de Phys.*, t. LIII, p. 337) qu'il n'y a de maximum de contraction que pour les veines qui sont lancées de bas en haut, et que dans tous les autres cas la section de la veine va toujours en diminuant depuis l'orifice jusqu'à l'instant où elle se trouble et se divise, comme nous le verrons tout à l'heure : seulement, la contraction qui est d'abord très-rapide, devient très-faible à partir d'une distance égale à peu près au diamètre de l'orifice.

Si donc, au lieu de considérer la vitesse des molécules fluides dans l'orifice lui-même, on la considère dans la section de la veine qui se trouve à une petite distance, au point où la *rapide contraction* s'est accomplie, il est évident qu'elle est d'autant plus grande que la section est plus petite, ou, en d'autres termes, que les vitesses sont en raison inverse des sections, car c'est la même quantité de liquide qui passe dans le même temps. Pour la section dont il s'agit, la vitesse effective est par conséquent égale à la vitesse théorique.

Le théorème de Torricelli une fois démontré, il est facile de voir comment il faut disposer les appareils pour démontrer les trois conséquences que nous en avons tirées, et pour faire voir aussi que le jet prend une *courbure parabolique* lorsqu'il s'échappe par une ouverture latérale sous diverses inclinaisons.

93. **Constitution de la veine fluide.** — On avait remarqué depuis bien longtemps qu'une veine fluide se compose toujours de deux parties distinctes : l'une, voisine de l'orifice, qui est calme, *transparente*, et semblable à une tige de cristal; l'autre, plus éloignée, qui est *trouble* et comme composée de gouttes discontinues; mais l'on doit à Savart une analyse complète et extrêmement remarquable de la vraie constitution de la veine et des diverses apparences qu'elle présente. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici qu'un résumé très-succinct de ses belles observations.

La figure 17 représente une veine fluide lancée de haut en bas, telle qu'elle paraît être lorsqu'on la regarde, *an* est la partie fixe, *nvv'* est le commencement de la partie trouble qui semble se composer de ventres et de nœuds alternatifs. La figure 18 représente la veine fluide précédente, telle qu'elle est en réalité : toute la partie trouble est composée de gouttes distinctes et séparées l'une de l'autre; les ventres étant formés par de larges gouttes aplaties horizontalement, tandis que les nœuds sont formés de gouttes allongées dans le sens vertical. Comme il arrive d'ailleurs que les ventres et les nœuds occupent des positions fixes, il faut nécessairement que la même goutte *a*, qui est aplatie dans les ventres, soit allongée lorsqu'elle arrive au point où paraît le premier nœud *n'*; qu'elle soit de nouveau aplatie au deuxième ventre, allongée au deuxième nœud, etc.; il faut, par conséquent, qu'elle éprouve des vibrations périodiques parfaitement régulières qui la fassent passer de l'une à l'autre de ces formes. Toutes les gouttes paraissent avoir le même diamètre et éprouver les mêmes changements. Il paraît toutefois qu'entre deux gouttes consécutives il existe une autre goutte beaucoup plus petite, qui, par un effet de la vision, donne aux ventres l'apparence tubulaire que l'on observe.

Savart a pareillement constaté que chaque goutte est produite par un renflement annulaire qui prend naissance très-près de l'orifice, et qui se propage sur la partie limpide de la veine, en augmentant de volume jusqu'au moment où il s'en détache; qu'il y a, par conséquent, à l'orifice même, une succession pé-

riodique de pulsations, et que leur nombre est en raison directe de la vitesse d'écoulement et en raison inverse du diamètre de l'orifice.

Les pulsations dont il s'agit sont assez rapides et assez régulières pour donner naissance à un son bien caractérisé, et si, avec un timbre ou un instrument de musique, on produit à quelque distance le même son ou un son voisin, on obtient une modification remarquable dans la veine, même quand elle est lancée de bas en haut (Fig. 11, 12); les ventres et les nœuds prennent plus de régularité, et ils envahissent la partie transparente qui se réduit presque à rien; cependant la dépense reste constante.

La présence de l'air n'a aucune influence sur la forme et les dimensions des veines, non plus que sur le nombre des pulsations.

Ces résultats s'appliquent aux jets lancés horizontalement ou obliquement de bas en haut, pourvu que l'inclinaison ne dépasse pas 45°; car, à cette limite, la veine commence à avoir un maximum de contraction qui est de plus en plus marqué à mesure que le jet approche d'être vertical.

Quand les orifices ne sont pas circulaires, la veine présente des changements de forme très-remarquables qui ont été particulièrement étudiés par MM. Poncelet et Lesbros. Par exemple, pour un orifice carré, de 20 centimètres de côté, les sections de la veine faites aux distances de 20, 30 et 40 centimètres sont représentées dans la figure 14. Le n° 1 est l'orifice, et les nos 2, 3 et 4 sont les sections à 20, 30 et 40 centimètres de l'orifice. La paroi étant verticale, la direction primitive de la veine était horizontale. Le point *h* désigne partout sa partie supérieure. Il est facile de saisir les formes intermédiaires et de se représenter le relief singulier de cette veine parabolique.

94. Des ajutages, et de leur influence sur l'écoulement. — On appelle *ajutages* des tuyaux de diverses formes ou des plaques courbes, percées de diverses manières, qui s'ajustent aux orifices en minces parois pour donner passage au liquide qui s'écoule.

Le plus simple des ajutages est celui qui a la forme exacte que prend la veine depuis l'orifice jusqu'à la section contractée. Lorsqu'il est travaillé avec soin, et que sa surface intérieure est bien polie, il n'exerce aucune influence sur la dépense.

Une paroi courbe, percée d'un orifice, ne donne pas la même dépense qu'une paroi plane, percée d'un orifice de même grandeur ; elle donne une dépense plus grande quand sa concavité est tournée vers l'intérieur (Fig. 15), et une dépense moindre quand elle est tournée vers l'extérieur (Fig. 16).

Dans les *ajutages cylindriques* de même diamètre que les orifices en minces parois auxquels ils sont appliqués, il se produit un phénomène singulier : tantôt la veine fluide reste *libre*, et passe dans l'ajutage sans le toucher ; tantôt elle devient *adhérente*, et l'écoulement se fait à *gueule-bée*, c'est-à-dire à plein tuyau. Dans le premier cas, la présence de l'ajutage n'a d'influence ni sur la vitesse ni sur la dépense ; il ne peut produire aucun effet, puisqu'il n'a aucun point de contact avec le liquide. Dans le second cas, l'adhérence qui s'établit entre la surface de la veine et les parois de l'ajutage détermine une augmentation de vitesse et une augmentation de dépense. La dépense du premier cas est à celle du second comme 100 est à 133, pourvu toutefois que le diamètre de l'ajutage soit à peu près le quart de sa longueur. Ce phénomène dépend de plusieurs causes, et surtout de la pression : sous de faibles charges, la veine est toujours adhérente, même pour les ajutages très-courts ; sous de grandes pressions, la veine reste libre ; et, sous des pressions intermédiaires, on peut à volonté produire l'écoulement à veine libre ou à veine adhérente : il suffit d'un léger obstacle pour établir l'adhérence, et il suffit quelquefois du moindre choc pour que la veine se détache des parois de l'ajutage et coule librement.

Quand l'adhérence est établie, la veine fluide se contracte dans l'ajutage près de la paroi, comme elle ferait à l'air libre (Fig. 3) ; on peut s'en assurer en faisant l'expérience avec un tube de verre, et l'on peut s'en assurer encore en donnant à l'ajutage la forme elle-même de la veine contractée (Fig. 4) : avec ce rétrécissement, la dépense est encore 133, comme elle était auparavant.

Un *ajutage conique* peut donner une dépense encore plus grande que l'ajutage cylindrique.

S'il y a des ajutages qui augmentent la dépense, il est très-facile d'en construire aussi qui la diminuent dans un très-grand rapport. Tout renflement dans un ajutage conique ou cylindrique produit une diminution de vitesse ; les *réflexions*, les

remous, les chocs des molécules animées de mouvements contraires, produisent une grande complication de phénomènes, et en dernier résultat une grande diminution dans la dépense.

Dans des tubes très-fins, les liquides cessent de s'écouler, même sous des pressions quelquefois considérables : ainsi, le mercure cesse de s'écouler, sous une pression de 9^{mm}, dans un tube de 357 millimètres de longueur et de $1^{mm},12$ de diamètre.

95. De l'unité de mesure dans la distribution des eaux. — L'unité de mesure, pour les eaux courantes, était connue autrefois sous le nom de *pouce de fontenier* ou *pouce d'eau*. C'est la quantité d'eau qui coule, en une minute, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé dans une paroi verticale, avec une charge d'eau de sept lignes sur le centre de l'orifice, ou d'une ligne au-dessus de son point culminant. Le volume d'eau qui s'écoule dans de telles circonstances est de 14 pintes anciennes de Paris, ou 672 pouces cubes par minute; ce qui revient à $19^{\text{mét. cub.}}\,2$, en 24 heures. La quantité d'eau qui s'écoule par un orifice d'un demi-pouce de diamètre, dont le centre supporte également une pression de 7 lignes, est quelquefois, mais à tort, appelée *un demi-pouce d'eau;* ce n'est véritablement que *un quart de pouce*, ou, par minute, le quart de 14 pintes. C'est Mariotte qui a autrefois déterminé par l'expérience la valeur de cette unité et le sens qu'il faut attacher à ses subdivisions (Œuvres de Mariotte, Ier et IIIe discours sur la mesure des eaux courantes et jaillissantes). Près d'un siècle plus tard, on voit dans un mémoire de Pitot que ces déterminations étaient adoptées dans la pratique (*Mémoires de l'Académie des sciences*, 1735).

96. Des pressions latérales qu'exercent les liquides en mouvement. — Un liquide qui coule dans des ajutages ou des tuyaux exerce toujours contre leurs parois une moindre pression que s'il était en repos. Daniel Bernouilli exprime cette pression qui a lieu pendant le mouvement par $h-h'$.

Pour comprendre cette formule, considérons la vitesse effective qui anime les molécules liquides dans la section perpendiculaire à l'axe du tuyau ou de l'ajutage pour laquelle on veut calculer la pression : cette vitesse est due, par le théorème de Torricelli, à une certaine hauteur de niveau qui est la valeur de h'. Concevons ensuite que le tuyau soit coupé suivant cette

même section, de telle sorte qu'elle reste ouverte et devienne elle-même l'orifice d'écoulement; alors le liquide prendrait une certaine vitesse, et la valeur de h désigne la hauteur de la colonne liquide qui serait capable de la produire. Cette valeur de h n'est pas nécessairement égale à la hauteur réelle du niveau au-dessus du centre de la section; elle peut être un peu plus petite par l'effet de la contraction, ou un peu plus grande par l'influence des ajutages. Si h' se trouve égal à h, la pression est nulle, et les parois ne supportent absolument aucun effort. Si h' est plus grand que h, la pression est négative, c'est-à-dire qu'au lieu d'une pression sur la paroi du tuyau, il s'exerce une véritable *succion*.

Les expériences par lesquelles on a vérifié jusqu'à présent la formule de Bernouilli ne sont ni assez nombreuses ni assez précises pour qu'on puisse l'employer avec une entière confiance. Cependant le phénomène de succion qu'elle indique est un fait remarquable sur lequel il ne peut rester aucun doute; il fut constaté par Bernouilli lui-même, et depuis il a été étudié plus particulièrement par Venturi et par Hachette.

Voici les circonstances dans lesquelles il se produit.

Nous avons vu que, par un ajutage cylindrique, quand la veine est adhérente, la dépense est plus grande que par un orifice en mince paroi de même diamètre; donc la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, et par conséquent h' est plus grand que h, ce qui doit produire le phénomène de la succion.

En effet, si l'on perce l'ajutage d'une petite ouverture latérale pour y mettre un tube recourbé tel que xy (Fig. 2, 3), le liquide monte dans l'intérieur de ce tube, et la hauteur de la colonne soulevée donne la mesure de la force d'aspiration. La différence étant plus grande encore par l'ajutage à double cône (Fig. 4), l'aspiration doit être encore plus grande; c'est ce qui est complétement vérifié par les expériences de Venturi.

97. De la réaction qui est produite par l'écoulement des fluides. — Concevons un vase de forme cubique, porté sur des roulettes très-mobiles, et posé sur un plan horizontal qui offre peu de frottement. Le vase rempli de liquide restera en repos, parce que toutes les pressions latérales sont égales et contraires. Mais si l'on perce la paroi pour que le liquide jaillisse latéralement, le vase sera repoussé en sens contraire, il y aura un recul semblable au recul des armes à feu ou des fusils à vent (**30**).

Cette réaction est rendue sensible par un appareil que l'on appelle le *tourniquet hydraulique* (Fig. 9). Il se compose d'un réservoir *v* mobile autour d'un axe vertical, portant à sa partie supérieure un robinet *r* qu'il suffit d'ouvrir pour mettre l'appareil en mouvement. En effet, la pression atmosphérique s'exerçant alors sur le liquide intérieur, l'écoulement se fait par les tubes *t* et *t'*; mais ceux-ci ayant leurs extrémités recourbées horizontalement et en sens contraire en forme de Z, les jets qui s'en échappent se trouvent dirigés tangentiellement aux cercles que tendent à décrire les orifices de sortie, et leur réaction sur les tubes forme un couple qui imprime à l'appareil un mouvement de rotation très-rapide.

On a cru longtemps, sur l'autorité de Newton, que le recul de cette espèce était égal au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur la hauteur du niveau. Mais Daniel Bernouilli a démontré que, dans tous les cas d'écoulement, la force de réaction est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur le *double* de la hauteur du niveau. C'est sur ce principe qu'est fondée la roue hydraulique connue sous le nom de *turbine*, dont on se sert avec de grands avantages depuis les derniers perfectionnements qu'elle a reçus.

98. Jets d'eau. — Il y a des jets d'eau qui s'élèvent verticalement de bas en haut, et il y en a d'autres qui s'élèvent en gerbes suivant des paraboles de diverses amplitudes. Les orifices qui donnent naissance aux jets verticaux sont percés dans des parois horizontales, et ceux qui donnent naissance aux jets paraboliques sont percés dans des parois diversement inclinées. Dans tous les cas, la direction du jet est produite par la pesanteur, qui est toujours verticale, et par la pression ou la force impulsive, qui est toujours perpendiculaire à la paroi. D'après le théorème de Torricelli, les molécules liquides ayant à l'orifice la même vitesse que si elles fussent tombées d'une hauteur égale à la hauteur du niveau du liquide dans le réservoir, on voit que cette vitesse, dirigée de bas en haut, serait précisément capable de faire remonter toutes les molécules jusqu'à la hauteur de ce niveau d'où elles sont censées descendues. Ainsi, la hauteur du jet vertical serait toujours égale à l'élévation du niveau au-dessus de l'orifice. Mais il y a plusieurs causes qui empêchent

les eaux jaillissantes d'atteindre à cette hauteur théorique : elles éprouvent des frottements contre les parois des tuyaux qui les amènent depuis le réservoir jusqu'à l'orifice et contre l'orifice lui-même dont elles rasent les bords avec une grande vitesse; elles éprouvent la résistance de l'air atmosphérique, et enfin les eaux qui retombent du point le plus élevé du jet retombent sur les eaux ascendantes et leur enlèvent du mouvement. Pour réduire toutes ces résistances à leurs moindres valeurs, on a coutume de suivre dans la pratique les règles suivantes :

1° On donne aux tuyaux de conduite un diamètre qui dépend de leurs longueurs, de la grandeur de l'orifice et de la hauteur du réservoir; de telle sorte que la vitesse de l'eau dans les tuyaux soit tout au plus de 2 ou 3 décimètres par seconde.

2° On fait l'orifice circulaire et on le perce en *mince paroi* dans une plaque que l'on appelle la *platine* : la platine est plane ou courbée en forme de calotte convexe, suivant que l'on veut avoir un jet vertical ou une gerbe à plusieurs jets paraboliques.

Tout ajutage, soit cylindrique ou conique, donne un jet moins élevé que les orifices en minces parois.

99. Du choc d'une veine fluide contre un corps solide. — Savart a publié sur ce sujet un grand travail (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LIV), dont nous allons extraire les résultats les plus élémentaires.

Concevons un tube de 2 mètres de hauteur, de 1 décimètre de diamètre, disposé verticalement, et muni à sa partie inférieure d'un orifice en mince paroi circulaire, et de 10 à 12 millimètres de diamètre; supposons qu'après l'avoir rempli d'eau, on découvre l'orifice, mais qu'au lieu de laisser tomber la veine librement, on la reçoive à 20^{mm} de l'orifice, sur un disque de métal de 27^{mm} de diamètre, dont la surface soit plane et polie, et dont le centre tombe directement sous le centre de l'orifice (Fig. 19). Alors la veine fluide présente les phénomènes suivants :

1° Elle s'épanouit sur le disque, prend l'apparence d'une nappe à peu près conique, dont la partie centrale *ab* est mince, unie et transparente, tandis que la zone extérieure *aa'*, *bb'*, n^{os} 1 et 2, est trouble, sillonnée de stries, les unes circulaires, les autres rayonnantes, qui lancent au pourtour une foule de petits jets ou de petites gouttelettes tombant en pluie. Cette zone est comme *l'auréole* de la nappe transparente, et leur ensemble forme une *nappe auréolée*. Les nappes de cette espèce

éprouvent des pulsations périodiques, c'est-à-dire qu'elles s'élèvent et s'abaissent un peu, et qu'en même temps elles augmentent ou diminuent de diamètre : les pulsations sont assez rapides pour produire un son.

2° La pression diminuant à mesure que le niveau baisse dans le tube, le diamètre total de la nappe augmente, mais l'auréole diminue, de telle sorte que, sous la pression de 60 à 62 centimètres, l'auréole a disparu; et la nappe arrive à la fois à une transparence complète et au maximum de diamètre n° 3.

3° A partir de ce maximum, le diamètre diminue, et en même temps la nappe se recourbe, s'arrondit, et, sous la pression de 32 à 33 centimètres, elle se ferme entièrement, n° 4; son diamètre est alors de 40 à 45 centimètres.

4° La pression diminuant de plus en plus, la nappe reste fermée, mais son diamètre continue à diminuer graduellement, jusqu'à la pression de 10 à 12 centimètres; à cette époque elle change brusquement d'aspect, elle se relève sur le disque, n° 5; puis, un instant après, elle retombe à sa forme première, n° 6, se relève de nouveau, et passe ainsi 7 ou 8 fois d'une forme à l'autre, en diminuant de volume jusqu'à ce qu'enfin elle disparaisse entièrement.

Ce phénomène remarquable ne pouvant être étudié que d'une manière passagère, au moyen d'un simple tube où le niveau diminue sans cesse, Savart a imaginé l'appareil suivant, pour maintenir une pression donnée aussi longtemps que l'expérience l'exige (Pl. 6, Fig. 13, n^os^ 1, 2, 3, 4, 5).

tt' (Fig. 13) est le tube à l'extrémité inférieure duquel on adapte les ajutages en mince paroi, représentés sur une plus grande échelle au-dessous de la figure 13, n^os^ 2 et 3. Ce tube a $4^{m},5$ de hauteur, et 54^{mm} de diamètre; son extrémité supérieure s'engage dans le fond d'un réservoir où le niveau est maintenu constant, au moyen d'un siphon à robinet qui verse le liquide dans la caisse *c*, et au moyen du déversoir *d*; un gros robinet *r*, muni d'une tige et d'une poignée *s*, sert à modérer convenablement la quantité d'eau que le réservoir donne au tube; enfin, pour graduer la pression, le tube *tt'* porte une espèce de manomètre *mnopq*, construit de la manière suivante : les parties *mn* et *opq* sont de verre, la partie intermédiaire *no* est de cuivre; un trou *h*, qui est percé latéralement au bas de celle-ci, et qui se ferme avec une cheville, sert à établir ou supprimer à volonté

la communication avec l'air extérieur; on verse du mercure à peu près à moitié de la hauteur dans les deux branches *op* et *pq*. Cela posé, le trou *h* étant ouvert, le mercure est au même niveau dans les deux branches du manomètre, et la pression atmosphérique s'exerce sur le sommet de la colonne liquide contenue dans le tube *tt'* et dans la branche *mn*, qui communique sans cesse avec lui; mais, dès que le trou est fermé, il est évident que par l'écoulement qui a lieu au bas du tube *tt'*, le mercure monte dans la branche *op* et descend dans la branche *pq*, et qu'en même temps le niveau de l'eau s'abaisse dans le tube *mn*. Soit *z* la différence des niveaux du mercure dans ces deux branches, et *p* la pression atmosphérique : l'air intérieur est alors sous une pression exprimée par une colonne de mercure $p-z$, ou par une colonne d'eau $(p-z)d$, d étant la densité du mercure; et, par conséquent dans l'état de repos, la pression de haut en bas qui s'exerce sur l'orifice surpasse la pression atmosphérique de $h-dz$, h étant la hauteur de l'eau dans le tube *tt'*. C'est en vertu de cet excès de pression que le liquide s'écoulerait, si le tube *tt'* était assez large pour que les vitesses y fussent très-petites; et comme on peut, en ouvrant convenablement le robinet *r*, maintenir le même excès de pression pendant longtemps, on arrive à produire des phénomènes durables, faciles à observer et à mesurer.

Les numéros 4 et 5 de la même figure 13 représentent les tiges aux extrémités desquelles sont les plans parfaitement ajustés qui reçoivent la veine et qui l'épanouissent.

Au moyen de cet appareil, Savart a pu constater les résultats suivants pour la température 0°.

1° Les nappes ouvertes et unies se font pour tous les orifices à une pression à peu près double de celle qui est nécessaire pour faire les nappes fermées. 2° Les diamètres des nappes fermées sont à peu près proportionnels à ceux des orifices. 3° les nappes se ferment à des pressions d'autant plus grandes que le diamètre des orifices est plus petit. Savart a pareillement découvert qu'à partir de 10 ou 20 millimètres, l'augmentation de distance du disque à l'orifice donne lieu à des phénomènes analogues à ceux d'une augmentation de pression, ou réciproquement; que la température du liquide a une telle influence sur le diamètre maximum des nappes, qu'à 1 ou 2° il est beaucoup plus petit qu'à 0, et surtout beaucoup plus petit qu'à 4°; que la

nature du liquide a une influence encore plus marquée, comme on le voit sur l'alcool, l'huile, l'éther, le mercure, et surtout sur l'eau elle-même, puisque l'addition d'une très-petite quantité d'acide empêche complétement la formation des nappes.

Les figures 21, 22 représentent les nappes qui résultent de l'épanouissement d'une veine verticale, lorsqu'elle vient frapper le plan par un mouvement de bas en haut, plus ou moins rapide; et la figure 20 les nappes d'une veine horizontale.

Savart a pareillement étudié les effets du choc de la veine sur d'autres corps, et particulièrement sur un cylindre de verre de 27 millimètres de diamètre; les figures 23, 24, 25, 26, 27 représentent les résultats que l'on obtient dans ce cas avec un orifice de 3 millimètres, sous une pression de 152 centimètres, suivant que la veine, toujours horizontale et perpendiculaire au cylindre, vient le frapper plus haut ou plus bas; près de chaque figure est la coupe du cylindre et le point d'attaque du jet,

100. Du choc des deux veines fluides opposées. — C'est encore à Savart que l'on doit la connaissance des phénomènes que présente le choc de deux veines fluides opposées (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LV). Le principal appareil qui a servi à ces expériences est représenté dans la figure 10 : il se compose de deux réservoirs cylindriques *a*, *a'* de $1^m,37$ de hauteur et de $0^m,22$ de diamètre, disposés en face l'un de l'autre à la distance de 35 à 40 centimètres; dans les douilles *b*, *b'* s'adaptent les tubes cylindriques *c*, *c'*, à l'extrémité desquels se vissent les orifices; la garniture en filasse de ces tubes permet de donner aux axes des orifices des directions exactement coïncidentes ou légèrement inclinées vers le haut.

Vases de même diamètre, orifices égaux. — Les pressions étant égales, on découvre les orifices qui peuvent avoir de 3 à 6 millimètres de diamètre, et à l'instant où les veines se choquent, une belle nappe plane se forme au milieu de l'espace qui sépare les orifices; elle est auréolée ou unie, suivant la pression, et elle acquiert son maximum de diamètre sous une pression déterminée, étant alors unie et transparente dans toute son étendue. Les pressions qui donnent le diamètre maximum sont en raison inverse des diamètres des orifices; aussi, pour les orifices de 6^{mm} et de 3^{mm} les pressions sont de 55 à 65 centimètres et de 105 à 120. Au-dessous du maximum, les diamètres sont proportionnels à la pression pour un même orifice, et ils

sont proportionnels aux aires des orifices, lorsque les orifices sont différents.

Si la pression est entretenue constante d'un côté, tandis qu'elle peut baisser de l'autre, on observe les phénomènes suivants :

Au moment où l'on découvre les orifices, les pressions étant égales, la nappe se développe au milieu de leur intervalle; mais bientôt cette nappe est poussée contre l'orifice du vase dont le niveau s'est abaissé, elle s'applique contre la paroi et prend alors tous les caractères d'une veine qui choque un plan : c'est-à-dire qu'elle est conique et auréolée sous une forte pression; courbe, unie et ouverte, sous une pression moindre; et, enfin, unie et fermée sous les pressions très-faibles. On observe en même temps que le vase qui ne reçoit point de liquide est sensiblement au même niveau que l'autre; ainsi, la nappe le ferme hermétiquement, et présente alors ce phénomène singulier d'une colonne en repos qui fait équilibre à une colonne en mouvement de même hauteur. Cette conséquence s'étend même au cas où la veine a une section un peu moindre que celle de la colonne qui est en repos, et elle s'étend encore au cas où le liquide en repos est plus ou moins dense que le liquide en mouvement : seulement, il faut alors que les hauteurs des colonnes soient en raison inverse de leurs densités, comme pour l'équilibre statique.

Orifices égaux, vases inégaux. — Lorsque les deux vases ont des diamètres différents, l'écoulement libre, c'est-à-dire celui qui se fait sans ajouter de nouveau liquide aux vases, présente des alternatives dont il est facile de se rendre compte : le petit vase se vide alors avec une vitesse périodiquement variable.

Orifices inégaux, vases égaux. — Les deux vases communiquant entre eux pour qu'ils soient maintenus exactement au même niveau, on observe que, pour le cas où le diamètre du grand orifice n'est pas plus que triple de celui du petit, la nappe présente les phénomènes indiqués par la figure 20, n^os^ 1, 2 et 3; c'est-à-dire que, si la nappe est conique pour les fortes pressions n° 1, elle devient ensuite unie et courbe n° 2, pour des pressions moindres; enfin elle se ferme tout à fait n° 3, pour des pressions encore plus petites.

Savart est encore parvenu aux conséquences suivantes par

d'autres séries d'expériences sur la pression des veines liquides et sur la rapidité avec laquelle l'équilibre s'établit entre deux vases, l'un plein et l'autre vide, quand c'est une veine liquide qui établit la communication.

1° La vitesse de toutes les molécules qui composent une tranche normale à l'axe d'une veine est exactement la même.

2° La pression exercée par une veine lancée de haut en bas contre un plan qui lui est normal, et dont le diamètre est égal à celui de la veine au point de contact, est mesurée par le poids d'une colonne d'eau dont la hauteur serait égale à la distance comprise entre le plan choqué et le niveau du liquide dans le réservoir, et dont le diamètre serait égal à celui de la veine au point où elle rencontre le plan.

3° La pression exercée par la veine devient égale au triple de cette quantité, lorsqu'elle a lieu sur un plan horizontal dont le diamètre est le même que celui de la nappe mince qui résulte de l'épanouissement du jet; et elle est seulement égale au double de cette quantité, lorsqu'on retranche de la pression totale le poids propre de la nappe mince.

4° Quand la pression s'exerce sur une surface concave hémisphérique, elle peut devenir égale au quadruple de la colonne liquide qui a pour diamètre le diamètre de la veine au contact du corps choqué, et pour hauteur la distance de ce point à la surface du niveau.

5° Lorsque deux vases de même diamètre, armés d'orifices égaux, sont disposés de manière que la veine lancée par l'un puisse pénétrer au travers de l'orifice de l'autre, si l'un de ces vases est plein et l'autre vide, la charge de liquide se partage également entre les deux, et le temps nécessaire pour que les deux colonnes arrivent à l'égalité de hauteur n'est que les deux tiers de celui qu'il faut pour le même partage, lorsque les vases communiquent directement entre eux par un orifice de même diamètre que celui qui lance la veine. Si le vase qui contient d'abord seul le liquide est entretenu à un niveau constant, le vase qui reçoit la veine arrive aussi à l'égalité de pression dans les deux tiers du temps qui est nécessaire pour que cette égalité s'établisse lorsque les vases communiquent directement entre eux.

101. Divers appareils pour le mouvement des liquides. — Comme application des principes précédents et du jeu des

pressions atmosphériques, nous essayerons de faire connaître quelques machines usuelles. Nous en avons renvoyé la description à la fin du chapitre, pour ne pas interrompre l'exposition générale.

102. Du siphon.— Le siphon est un tube recourbé *bsb'* (Pl. 7, Fig. 1) : *bs* est la *courte branche; sb'* est la *grande branche at* est le tube d'aspiration, dont nous verrons dans un instant l'usage; mais, pour le moment, nous supposerons qu'il n'y soit pas. Les deux branches étant remplies de liquide, la pression est la même au point *b* et au point *n*, qui sont au même niveau; ainsi, en *b'* elle est plus grande de tout le poids de la colonne *nb'*. Le liquide s'écoule par la grande branche en vertu de cet excès de pression, et sa vitesse est la même que s'il fût tombé de la hauteur *nb'*.

La même cause fait continuer l'écoulement, tant qu'il y a du liquide en *b*. Si cette extrémité de la courte branche plonge dans un vase, le vase se vide, et la vitesse d'écoulement est toujours produite par la différence de hauteur des deux branches, en prenant pour hauteur de chacune d'elles la distance du sommet *s* au niveau du liquide dans lequel elle plonge. Le tube d'aspiration est destiné à *amorcer* le siphon, c'est-à-dire à le remplir de liquide pour le mettre en activité. Les figures 2 et 3 représentent des siphons d'une autre espèce, dont on devinera facilement les effets. Lorsqu'on verse de l'eau dans ces vases que l'on appelle *vases de Tantale*, elle y reste comme dans un verre ordinaire, tant qu'elle n'arrive pas à la hauteur *nn'*; mais arrivée là, si l'on verse une goutte de plus, le siphon s'amorce, et le vase se vide complétement.

Le siphon n'est pas seulement d'un usage journalier pour le transvasement des liquides; dans quelques circonstances, il a été employé avec avantage à détourner le cours des rivières pour exécuter de grands travaux hydrauliques.

Mais, dans tous les cas, il faut que le liquide puisse s'élever jusqu'au sommet *s* du siphon, et, pour cela, il faut que sa hauteur verticale au-dessus du niveau libre correspondant à la petite branche, soit moindre que la longueur de la colonne qui fait équilibre à une pression atmosphérique.

103. Fontaine de compression. — *v* (Fig. 5) est un vase de cuivre à parois très-solides; *t* un tube qui fait corps avec le robinet *r*; ces deux pièces sont soudées, et leur ensemble peut

se visser sur le col du vase *v*; *j* est l'ajutage d'écoulement, il se visse au-dessus du robinet *r* : c'est de la grandeur de son orifice que dépend le diamètre du jet; *nn'* est le niveau de l'eau dans le vase. Au moyen d'une pompe foulante qui s'adapte à la place de l'ajutage, au-dessus du robinet *r*, on comprime l'air dans l'espace *nan'*. Alors la fontaine est chargée; on ferme le robinet, on ôte la pompe, on visse l'ajutage; et, en ouvrant le robinet, le liquide jaillit à une grande hauteur : à 10 ou même à 50 mètres, si l'air est comprimé à 2 atmosphères, ou à 5 ou 6 atmosphères.

104. Fontaine intermittente. — *r* (Fig. 5) est le réservoir d'eau, *jj'* sont les ajutages d'écoulement : la figure n'en représente que deux; *t* est *le tube de pression :* son extrémité supérieure s'élève au-dessus du niveau *nn'* de l'eau du réservoir; *p* est le pied de la fontaine, où se trouve le secret des intermittences : on y distingue une échancrure *e* à l'extrémité inférieure du tube *t*, et une ouverture *v* par laquelle l'eau passe du premier fond sur le second. Quand l'échancrure est à nu, l'air passe dans le tube et vient exercer une pression atmosphérique sur la surface *nn'* de l'eau du réservoir; quand l'échancrure est baignée par l'eau qui s'accumule sur le premier fond, l'air ne peut plus entrer par le tube, et, la pression diminuant de plus en plus dans le réservoir, l'écoulement cesse jusqu'à ce que l'échancrure soit dégagée et que l'air puisse de nouveau passer dans le tube.

Ainsi, la durée des intermittences dépend des grandeurs relatives de l'ouverture *v* et des ajutages, de la hauteur de l'échancrure, et de la distance des ajutages au niveau de l'eau du réservoir.

105. Fontaine de Héron. — Cet appareil (Fig. 8) se compose de trois vases : un vase supérieur *a*, un vase moyen *b*, et un vase inférieur *c*; et de trois tubes : le premier *x* descendant du fond du vase supérieur au fond du vase inférieur; le second *y* s'élevant du sommet du vase inférieur jusqu'au haut du vase moyen; et le troisième *z* s'élevant du fond du vase moyen jusqu'à 2 ou 3 décimètres au-dessus du vase supérieur; c'est celui-ci qui forme le jet de la fontaine de Héron. On met de l'eau dans le vase *b*, au moyen de l'ouverture *p*, que l'on ferme ensuite avec son bouchon; on met pareillement de l'eau dans le vase *a*, on ouvre le robinet *r*, et le liquide s'élance jusqu'à un

point qui est autant élevé au-dessus du niveau du vase moyen que le niveau du vase supérieur est lui-même élevé au-dessus du niveau du vase inférieur. Cette pression est en effet celle que supporte l'air qui est enfermé dans le vase inférieur et dans le vase moyen.

La figure 7 représente une autre fontaine de Héron, dont on devinera facilement la disposition : il suffit de quelques tubes de verre pour la construire.

106. Lampe à gaz hydrogène. — Cet appareil se compose d'un ballon à long col *b*, renversé dans un vase plus large *v* (Fig. 6), dont il ne touche pas tout à fait le fond; la jonction *cc'* doit être hermétiquement fermée; un cylindre creux de zinc *zz'* enveloppe le col du ballon; l'eau acidulée qui remplit le vase *v* agit sur le zinc, elle se décompose, son hydrogène se dégage, et par la pression croissante qu'il exerce, l'eau est de plus en plus refoulée dans le ballon *b*, jusqu'à ce que le niveau soit descendu au-dessous de la dernière tranche *z'* du zinc; alors toute action cesse et l'on a un réservoir rempli d'hydrogène comprimé. En tournant le robinet *r*, le gaz se dégage dans l'air par le tube *t*, qui doit être très-fin, et, mélangé à l'air atmosphérique, il s'enflamme au contact d'une éponge de platine.

107. Pompe aspirante et élévatoire. — La pompe aspirante (Fig. 9) se compose d'un *tuyau d'aspiration a*, d'un *corps de pompe b*, d'un *piston p*, d'un *tuyau d'ascension s*, et de trois *soupapes r*, *t*, *l*, qui s'ouvrent de bas en haut. La première soupape *r* est au fond du corps de pompe, la deuxième *t* est dans l'épaisseur du piston, et la troisième *l* est au bas du tuyau d'ascension. Le tuyau d'aspiration plonge dans l'eau que l'on veut élever, et la tige du piston passe dans une boîte à étoupe *e* et dans une boîte à graisse *g*. A l'origine du mouvement, le piston étant soulevé, sa soupape se ferme, et les deux autres *l* et *r* s'ouvrent, la première par l'air supérieur qui se comprime et s'échappe, la seconde par l'air inférieur qui se dilate et passe sous le piston. La pression diminue dans le tuyau d'aspiration, et l'eau s'y élève par l'effet de la pression extérieure. Arrivé au-dessus de sa course le piston redescend; la soupape inférieure se ferme, l'air se comprime dans le corps de pompe, soulève la soupape du piston, et passe au-dessus. En remontant une seconde fois, le piston soulève l'eau un peu plus haut, et en redescendant une seconde fois, il chasse une nouvelle quantité d'air. Enfin, après un certain nombre de coups, si la pompe est bien

faite, l'eau arrive au-dessus de la première soupape, elle monte de plus en plus, soulève elle-même la seconde soupape, et passe au-dessus du piston. A partir de cet instant, tout l'air est chassé, et la pompe joue dans l'eau. Chaque fois que le piston monte, il soulève toute la colonne d'eau qui est au-dessus de lui, et il entraîne celle qui est au-dessous; chaque fois qu'il descend, la première soupape se ferme, la sienne s'ouvre, et il s'en vient prendre par sa base la colonne qu'il avait entraînée, pour la soulever à son tour. L'effort qu'il faut faire pour soulever le piston se compose de deux parties : l'une est le frottement; l'autre est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le piston lui-même, et pour hauteur toute la hauteur à laquelle se trouve l'orifice par lequel l'eau du tuyau d'ascension *s* s'écoule dans l'air.

Pour que la pompe soit bonne, il faut que l'eau puisse atteindre à la première soupape *r*. Ainsi, la position de cette soupape dépend du degré de raréfaction que l'on peut donner à l'air qui est au-dessus d'elle, et ce degré de raréfaction dépend lui-même de l'étendue de la course du piston et de la distance des deux soupapes *t* et *r*. Quand cette distance est nulle, le vide est possible, et, à la rigueur, la soupape *r* pourrait être à $10^{m},30$ de hauteur au-dessus du niveau de l'eau qu'il s'agit d'élever. Si cette distance des deux soupapes était seulement de 1 décimètre, et que le piston n'eût que 2 décimètres de course, l'air ne pourrait être amené par le jeu de la pompe qu'à une demi-pression atmosphérique, et la soupape *r* ne pourrait être tout au plus qu'à 5 mètres de hauteur. Il est facile de calculer la relation générale qui existe entre ces divers éléments.

108. Pompe aspirante et foulante, à corps de pompe alésé. — Cette pompe (Fig. 10) se compose d'un tuyau d'aspiration *a*, d'un tuyau d'ascension *s*, d'un corps de pompe *c*, et d'un piston *p*; mais elle a seulement deux soupapes, *r* et *l*, d'aspiration et d'ascension; rien ne passe au travers du piston ni sur son contour, et sa face supérieure est toujours en communication libre avec l'atmosphère.

Quand le piston monte, l'eau est aspirée au-dessus de la soupape *r*, et, quand il descend, elle est comprimée, presse la soupape *r* et soulève la soupape *l*.

109. Pompe aspirante et foulante, sans corps de pompe laésé ou à piston plongeur. — Cette pompe, représentée dans

la figure 11, diffère de la précédente par la forme de l'ajustement du corps de pompe et du piston. Les deux soupapes *r* et *l* du tuyau d'aspiration *a* et du tuyau d'ascension *s* sont aussi un peu différentes; elles sont disposées pour les grandes pressions. La première *r* se compose de deux clapets inclinés qui viennent *butter* contre les arrêts *i* et *i'* quand ils sont soulevés par l'aspiration, et qui retombent sur le prisme *z* quand ils sont pressés de haut en bas pendant que le piston descend; la seconde *l* se compose d'un seul clapet incliné. L'ajustement que l'on voit au-dessus est un *regard* pour visiter la soupape et la changer au besoin. Le corps de pompe n'est point alésé, parce que le piston ne le touche pas. Le piston est un cylindre de métal, cylindrique, qui passe dans la boîte à étoupes *e*, et dans la boîte à graisse *g*; c'est là qu'est la véritable fermeture de la pompe.

Il est indispensable de ménager un petit conduit pour donner issue à l'air qui se dégage de l'eau, et qui pourrait mettre la pompe hors de service en remplissant le corps de pompe. On peut le faire de deux manières : ou en perçant l'épaisseur du corps de pompe, ou en forant le piston dans sa longueur, et ensuite latéralement, comme le représente la figure 11 en *tyu*; *t* est la vis de pression qui ferme l'ouverture de ce conduit.

M. Martin a établi à Marly des pompes de cette espèce, qui sont construites avec une rare perfection; elles élèvent l'eau à 170 mètres au-dessus du niveau de la Seine.

110. Pompe des prêtres. — Dans cette pompe, le piston est remplacé par une membrane élastique (Fig. 12) qui est arrêtée par ses bords, et qui offre en son milieu une soupape de métal *s'*. Quand la tige *t* soulève la membrane, le liquide est aspiré et entre par la soupape *s*; au contraire, quand la tige est abaissée, le liquide, comprimé entre les deux soupapes, soulève la soupape *s'* pour passer au-dessus du piston élastique.

C'est une pompe de cette espèce qui sert à faire monter l'huile dans les lampes de Gotten; on la dispose alors comme dans la figure 13 : *ccrr* représente la section verticale d'une petite caisse de cuivre qui est séparée en deux parties par la cloison *l*, la partie de droite se subdivise sur sa longueur en trois ou quatre petits compartiments semblables à celui que représente la figure. Une peau très-fine est alternativement soulevée et déprimée au moyen du fil *f*; quand elle se soulève, l'huile du

réservoir *r* entre par la soupape *s*; quand elle se déprime, l'huile est refoulée, et passe par la soupape *s'* pour monter dans le tube d'ascension *t*. Trois compartiments, ou trois pompes, ayant leurs soupapes séparées, suffisent pour la continuité du mouvement : l'une est au-dessus de sa course, l'autre au milieu, la troisième à la fin, et l'huile est toujours poussée dans le tuyau d'ascension avec une force à peu près égale. C'est un mouvement d'horlogerie qui met en jeu toutes ces pompes.

111. Presse hydraulique. — Cette machine offre de si grands avantages dans les exploitations agricoles et industrielles, qu'il nous a semblé nécessaire d'indiquer ici les détails de sa construction. Elle est représentée dans les figures 18, 19, 20, 21 et 22.

Figure 21. Élévation générale de la presse.

Figure 18. Coupe verticale.

Figure 20. Cuir embouti.

Figure 19. Pièces qui servent à ajuster le piston de la pompe.

Figure 22. Détails de la soupape de pression.

Il y a deux parties distinctes dans la presse hydraulique, savoir : une pompe aspirante et foulante qui donne la pression, et un plateau à piston qui la reçoit pour la transmettre immédiatement aux corps que l'on veut presser.

La pompe est vue dans l'élévation en *af* (Fig. 21), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en *af* (Fig. 18).

Le plateau à piston est vu dans l'élévation en *p'p* (Fig. 21), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en *p* (Fig. 18) (ici le plateau *p'* est enlevé, il ne reste que le piston).

La pompe donne la pression au piston *p* au moyen du tuyau *tbu* (Fig. 18, 21).

En levant le levier *l* (Fig. 21), on soulève le piston *s* de la pompe (Fig. 18), l'eau de la bâche *b* (Fig. 21) entre par la pomme d'arrosoir *r* (Fig. 18), soulève la soupape *i* et passe sous le piston *s*; quand on presse sur le levier *l*, on fait redescendre le piston *s*, l'eau est refoulée, elle ferme la soupape *i*, gagne le conduit *z* (Fig. 18), soulève la soupape *d*, et passe dans le tuyau *tbu* pour arriver dans le corps *cc'* de la presse (Fig. 18 et 21). Là, elle exerce son effort contre le piston *p*, et le force à monter avec le plateau *p'*, qui presse à son tour les corps contre la plate-forme *ee'* (Fig. 21).

Si la section du piston *s* est la centième partie de la section du piston *p*, un effort de 1 kilogramme sur le premier produira,

de bas en haut sur le second, une pression de 100 kilogrammes. Or, au moyen du levier *l*, un homme peut aisément exercer sur le piston *s* un effort de 300 kilogrammes; ainsi, le piston peut sans difficulté être poussé avec une puissance de 30 000 kilogrammes.

Tel est le principe fondamental de la presse hydraulique. Nous indiquerons maintenant comment on mesure les pressions et comment on est parvenu à éviter les fuites.

Les pressions se mesurent au moyen de la soupape *g* (Fig. 18 et 22). Connaissant le poids *p'*, sa distance *yf'* au point d'appui *f'*, la distance *xf'* du point par lequel le levier presse sur la soupape, et enfin la section de la soupape, il est facile de calculer la pression qu'elle éprouve de la part du liquide lorsque le levier *f'y* est soulevé.

Pour éviter les fuites, on ajuste d'abord avec un soin particulier le piston *s*; les pièces qui servent à cet usage sont vues en grand dans la figure 19, c'est la même disposition que dans la pompe de Marly (Pl. 7, Fig. 11). Mais la principale difficulté se trouvait au piston *p*; et c'est Bramah qui l'a résolue par l'heureuse invention du cuir embouti, dont on voit une coupe (Fig. 20). Ce cuir est disposé en *mm'* (Fig. 18), dans un espace annulaire, pratiqué à cet effet dans le corps *cc'* de la presse; il est facile de voir par sa forme et sa disposition qu'il ferme d'autant mieux que la pression est plus forte; car l'effet de la pression est de le pousser en même temps contre le piston *p*, qu'il embrasse étroitement, et contre les parois de l'espace annulaire.

La vis *k* (Fig. 18) sert à la *dépression* : lorsqu'on la détourne, le liquide revient du corps de la presse par le tube *ubt*, et s'échappe par l'ouverture *v*.

112. Bélier hydraulique. — Cette machine, qui fut découverte en 1797, par Montgolfier, l'inventeur des aérostats, n'est pas moins remarquable par le principe nouveau sur lequel elle repose, que par les nombreux avantages qu'elle peut offrir. Nous essayerons d'abord de faire comprendre le principe de mécanique d'où elle tire sa force motrice. Un corps quelconque, solide ou fluide, étant animé d'une certaine vitesse, imaginons que l'on arrête quelques-unes de ses parties; à l'instant toutes les autres, qui ne sont pas directement arrêtées, vont exercer sur celles-ci des efforts différents : celles qui sont en avant tendront à les entraîner après elles ou à s'en séparer;

celles qui sont en arrière, voulant aussi continuer leur route, se précipiteront en vertu de leur vitesse acquise, et se presseront les unes sur les autres en même temps qu'elles presseront les parties immobiles. Une flèche, par exemple, étant animée d'un mouvement rapide, si on l'arrêtait tout à coup par le milieu, la partie antérieure, tendant à entraîner la partie arrêtée, éprouverait une traction dans toute sa longueur, et cet effort pourrait la rompre si la vitesse était assez grande : au contraire, la partie postérieure, tendant à pousser la partie arrêtée, éprouverait une pression dans toute sa longueur, et toutes ses tranches seraient refoulées les unes sur les autres. De même, quand une colonne d'eau est en mouvement dans un tube et que tout à coup un obstacle l'arrête, elle presse cet obstacle en vertu de sa vitesse acquise; la première tranche qui le touche est bientôt arrêtée et pressée à son tour par la tranche qui vient après, et ainsi *successivement* jusqu'à la tête de la colonne; pendant ce temps, qui est très-court, le tuyau supporte un excès de pression latérale, dépendant de son diamètre et de la vitesse de l'eau, et c'est cet excès de pression résultant du mouvement arrêté qui devient la force motrice du bélier hydraulique.

tt' (Fig. 17) est un tuyau dans lequel se meut l'eau d'une source avec une vitesse dépendante de la hauteur de la chute; c'est le *corps du bélier*. L'eau s'écoulerait par l'orifice *v*, s'il n'y avait pas d'obstacle, et gagnerait le niveau *nn'*, qui est le niveau naturel au-dessous de la chute; mais, vers cette extrémité du tuyau, on ajuste diverses pièces qui forment la *tête du bélier*: *s* est une soupape dont la densité est double de celle de l'eau; l'eau peut la soulever par sa vitesse, et l'appliquer contre l'ouverture *v*, qui se trouve alors exactement fermée; on l'appelle *soupape d'arrêt*. Quand la soupape *s* est fermée, l'eau passe par le conduit *z* et s'élève dans le vase en fonte *bb'*, d'où elle passe par le clapet *c*, dans la grande cloche en fonte *hh'*, pour gagner enfin le tuyau d'ascension *dek*. Là, elle s'arrêterait lorsqu'elle serait parvenue à la hauteur du niveau supérieur de la chute, s'il n'y avait pas une force motrice capable de la pousser plus haut. Mais cette force se développe de la manière suivante : l'eau de la source ayant acquis assez de vitesse par son écoulement naturel, soulève la soupape *s* et ferme l'ouverture *v*; alors la pression latérale résultant du mouvement arrêté exerce un effort

sur tous les points de la paroi du tuyau. Cette pression pousse le liquide en *z*, le clapet *c* est soulevé, et l'eau passe dans la cloche *hh'* : la durée de cette ascension est un peu prolongée par la réaction élastique de toutes les pièces de l'appareil. Bientôt le clapet *c* et la soupape *s* retombent par leur poids, l'un pour fermer l'ouverture du vase *bb'*, et l'autre pour ouvrir l'orifice d'écoulement. La série des effets rapides qui se succèdent jusqu'à cet instant est ce que l'on nomme un *coup de bélier*. Dès que l'écoulement naturel a recommencé, la vitesse s'accélère promptement : la soupape *s* est de nouveau soulevée, et les mêmes phénomènes se reproduisent. On détermine par des essais la disposition des pièces, et surtout le jeu qu'il faut donner à la soupape *s* pour obtenir le plus grand effet possible. La limite de hauteur à laquelle on peut élever l'eau par cet appareil dépend du diamètre du tuyau et de la vitesse que l'eau peut prendre en le traversant.

On voit en *p* un piston qui sert à rendre de l'air pour remplacer celui qui est, en *i*, dans le vase *bb'*, et qui se dissout peu à peu; l'air rentre de lui-même et par le jeu de l'appareil.

Il paraît que dans la pratique le bélier donne plus de 60 pour 100 de la force réelle de l'eau de la source; c'est à peu près ce que peuvent donner les *roues à pots* les mieux construites; les *roues en dessous* ne donnent environ que 25 ou 30 pour 100.

CHAPITRE IX.

Du mouvement des gaz.

113. Les gaz peuvent s'écouler, comme les liquides, par des orifices en minces parois, par des ajutages ou par des tuyaux; ils peuvent s'écouler aussi sous des pressions constantes ou sous des pressions variables. Les appareils au moyen desquels on obtient des écoulements constants se nomment des *gazomètres*.

114. Des gazomètres. — Lorsqu'on recherche une grande précision, l'écoulement constant du gaz est produit par l'écoulement constant d'un liquide; rien n'est plus commode pour cet usage que le vase de Mariotte. On le dispose alors comme dans la figure 9, planche 6 : le grand col du ballon est mastiqué dans le réservoir de gaz; l'eau tombe par l'orifice v; s'il en arrive 20 litres en 1′, il faut que 20 litres de gaz soient chassés dans le même temps par les orifices ou par les tuyaux d'écoulement. Pour appliquer ce principe aux gaz différents de l'air, on les recueille dans de grandes vessies ou dans des ballons de baudruche ou de caoutchouc que l'on enferme dans un second réservoir; l'air qui sort du premier réservoir arrive dans le second, et exerce sur ces enveloppes flexibles une pression constante qui produit de même un écoulement constant. (Voy. IIe vol., *Calorimétrie.*)

Les grands gazomètres de l'éclairage sont construits sur un autre principe : un cylindre à un seul fond (Pl. 7, Fig. 14) est renversé sur une grande citerne remplie d'eau. Ce cylindre est en feuilles minces de métal, et a, par exemple, 10 mètres de diamètre, contient 100 mètres cubes de gaz, et pèse, je suppose, 10 000 kilogrammes. Il n'enfonce pas dans l'eau, puisqu'il est plein de gaz : seulement, il presse de tout son poids sur ce gaz intérieur, et le tient à une pression plus forte que la pression atmosphérique. Dans notre hypothèse, cet excès de pression serait de 10 000 kilogrammes sur une base de 5 mètres de rayon, ce qui fait à peu près une colonne d'eau de 13 centimètres. Si l'on conçoit maintenant que du fond de la citerne s'élève un tube qui vienne d'une part s'ouvrir un peu au-dessus du niveau intérieur

de l'eau pour communiquer avec le gaz du gazomètre, et qui s'en aille d'une autre part se subdiviser en une foule de ramifications terminées par des becs d'éclairage, on verra qu'il suffit de tourner un robinet pour éclairer une grande ville. L'écoulement du gaz sera constant, parce que le gazomètre ne fera qu'une petite perte de poids en s'enfonçant dans l'eau de la citerne; au reste, on peut, avec des contre-poids, lui donner encore plus de régularité ou modérer sa pression. Pour remplir le gazomètre, on ferme le robinet de distribution, et l'on ouvre un autre robinet qui établit la communication entre les cornues où se forme le gaz et le tube vertical qui s'élève du fond de la citerne au-dessus du niveau intérieur de l'eau.

115. Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de Daniel Bernouilli. — Daniel Bernouilli avait supposé que le théorème de Torricelli s'applique aux gaz comme aux liquides, et, en partant de ce principe, il exprimait la vitesse d'écoulement d'un gaz par la formule suivante :

$$v = \sqrt{2g \cdot p \cdot \frac{\varpi}{\varpi'}} \cdot \sqrt{(1 + at)\left(1 - \frac{h'}{h}\right)}.$$

v est la vitesse d'écoulement par seconde, exprimée en mètres.

g est la pesanteur ou $9^{m},8088$.

ϖ est le poids de l'unité de volume du liquide, qui sert à mesurer la pression normale des fluides élastiques.

ϖ' est le poids de l'unité de volume du gaz qui s'écoule pris à la température 0 et sous la pression normale.

p est la hauteur, exprimée en mètres, de la colonne liquide qui mesure la pression normale dont il est question plus haut.

a est le coefficient de dilatation du gaz.

t sa température.

h la pression *intérieure*, c'est-à-dire celle que supporte le gaz dans le réservoir d'où il s'écoule.

h' la pression *extérieure*, c'est-à-dire celle qui s'oppose à l'écoulement.

On suppose que le gaz s'écoule par un orifice en mince paroi, dont la section soit très-petite par rapport à celle du gazomètre qui fournit le gaz, et à celle du gazomètre ou de l'espace qui le reçoit, et que les pressions h et h' ne varient pas pendant la durée de l'expérience.

Si l'on prend pour pression normale la pression atmosphérique mesurée par une colonne de mercure, on a en même temps $p = 0^{m},76$; $\varpi = 13598^{kil}$.

S'il s'agit de l'air, on a aussi $\varpi' = 1^{k},2991$, et la formule devient

$$v = 395\sqrt{(1+at)\left(1-\frac{h'}{h}\right)}.$$

S'il s'agit d'un autre gaz dont la densité soit d par rapport à l'air, on aurait pour ce gaz ϖ'' au lieu de ϖ' et en même temps

$$\frac{\varpi''}{1} = \frac{\varpi'}{\varpi'} \quad \text{ou} \quad \varpi'' = d\varpi',$$

et la formule se présente sous la forme

$$v = 395\sqrt{\left(\frac{1+at}{d}\right)\left(1-\frac{h'}{h}\right)}.$$

Elle est alors tout à fait générale et applicable à un gaz quelconque, d étant la densité de ce gaz par rapport à l'air.

Quant aux pressions h' et h, comme elles n'entrent que par leur rapport, on peut à volonté les exprimer en eau ou en mercure.

En faisant les calculs pour l'air à la température 0 et pour des pressions voisines de la pression atmosphérique, on trouve les résultats suivants :

EXCÈS DE PRESSION EN MERCURE.	VITESSES EN 1" EN MÈTRES.
2 millimètres.	20 mètres.
5	32
10	45
20	64
30	78
40	91
50	101
60	111
100	135
150	160
200	180

Ainsi, pour de très-petites différences de pression, l'air prend des vitesses cependant très-considérables.

Si l'on représente par s la section, en mètres carrés, de l'ori-

fice par lequel l'air s'écoule, sv est le volume qui passe en 1″, et svn le volume qui passe dans un nombre n de secondes; c'est ce que l'on appelle la *dépense théorique;* en la désignant par m, on a, pour cette dépense exprimée en mètres cubes,

$$m = svn.$$

Il résulte des principes mêmes qui conduisent à la valeur générale de la vitesse, que ce volume constituant la dépense est mesuré sous la pression *intérieure* h, et non pas sous la pression *extérieure* h'.

Pour vérifier cette formule par l'expérience, on remplit un gazomètre, on observe les pressions, on mesure l'orifice, on compte le temps de l'expérience, et par divers moyens on apprécie le volume qui s'est écoulé, ou la *dépense réelle* m'. Alors, en représentant par v' la vitesse réelle inconnue, l'on a

$$m' = sv'n, \quad \text{d'où} \quad v = \frac{m'}{sn}.$$

Or, l'expérience démontre que cette vitesse ne coïncide pas avec la vitesse théorique v qui se déduit des pressions observées.

On trouve $v' = 0{,}65\,v$ pour les orifices en mince paroi.
$v' = 0{,}93\,v$ pour les ajutages cylindriques.
$v' = 0{,}94\,v$ pour les ajutages un peu coniques et rétrécis en dehors.

Comme ces résultats sont tout à fait analogues à ceux que l'on obtient pour les liquides, où la contraction de la veine est un phénomène apparent et mesurable, on en conclut qu'il y a aussi dans les gaz une contraction de la veine fluide. Alors la vitesse théorique devient exacte; mais au lieu de l'appliquer à la section même de l'orifice, il faut l'appliquer à une section plus petite, dans les proportions que nous venons d'indiquer.

Ainsi la dépense réelle sera en général

$$m' = ksvn.$$

k étant le *coefficient de la dépense* ou de la *contraction*, dont les valeurs varient de 0,65 à 0,93, ou à 0,94, suivant qu'il s'agit d'orifices en mince paroi, d'ajutages cylindriques, ou d'ajutages un peu coniques comme les buses des souffleries; v la vitesse théorique; s la section de l'orifice, et n le nombre des secondes de temps correspondant à la dépense m'.

Ainsi les pressions étant d'environ 2 centimètres de mercure dans la forge de maréchal; de 3 dans les fourneaux à la Wilkin-

son; de 3 à 6 dans les hauts fourneaux au bois, suivant que le charbon est tendre ou dur; de 10 à 20 dans les hauts fourneaux au coke; on voit que dans ces divers appareils l'air prendrait à la buse des vitesses comprises entre 70 mètres, et 160 ou 180 mètres par seconde, si la formule de Bernouilli était applicable à ces derniers cas. Mais nous allons voir que sous ces fortes pressions il est peu probable que l'air prenne des vitesses de plus de 100 mètres; du moins quand on entend par là, non pas la vitesse propre des molécules fluides, qui reste tout à fait inconnue, mais seulement sa *vitesse réduite*, c'est-à-dire celle dont on obtient la valeur en ramenant à la pression intérieure du réservoir le volume de gaz qui s'est écoulé.

On peut cependant comparer ces vitesses aux vitesses du vent qui, autant que des observations assez peu certaines peuvent l'indiquer, semblent être conformes au tableau suivant :

Tableau des vitesses du vent.

DÉSIGNATION.	VITESSE PAR SECONDE en mètres.	VITESSE PAR HEURE en kilomètres.
Vent seulement sensible	1	3,6
Vent modéré	2	7,2
Vent frais ou *brise* (tend bien les voiles)	6	21,6
Vent le plus convenable aux moulins	7	25,2
Bon frais, très-bon pour la marche en mer	9	32,4
Grand frais, fait serrer les hautes voiles	12	43,2
Vent très-fort	15	54,0
Vent impétueux	20	72
Grande tempête	27	97
Ouragan	36	129,6
Ouragan qui renverse les édifices	45	162

Ainsi les ouragans les plus violents sembleraient correspondre à une différence de pression d'environ 1 centimètre de mercure, et il suffirait d'une différence de 1 ou 2 millimètres pour produire des vents déjà très-forts.

116. On doit à M. Combes un *anémomètre* qui est aujourd'hui généralement adopté pour mesurer la vitesse du vent ou celle des courants d'air des mines. Il est représenté sur une échelle de moitié grandeur dans la figure 17 (Pl. 12). C'est un petit moulinet à quatre ailes inclinées, dont l'axe *a* porte

une vis sans fin, qui fait mouvoir la roue *r*, et à chaque tour de celle-ci la roue *r'* saute d'une dent. Au moyen de la tige *t*, on dispose l'appareil de manière que son axe soit dans la direction du courant; à un instant donné on tire l'un des cordons *c* qui dégage la détente *d*; aussitôt les ailes tournent, et en quelques secondes elles prennent toute leur vitesse. Après 2 ou 3 minutes, on tire l'autre cordon *c'*, pour faire marcher la détente en sens contraire et arrêter le mouvement. On connaît ainsi le nombre des secondes pendant lequel l'appareil a marché, et le nombre des tours qu'il a faits, puisque ce nombre se lit sur les roues *r* et *r'*. En divisant le second de ces nombres par le premier, on obtient le nombre *n* des révolutions en 1″; alors en le substituant dans une équation de la forme

$$v = 0^{m},2578 + 0,916n,$$

qui résulte de la graduation de l'instrument, on en déduit la vitesse *v* du courant, exprimée en mètres et rapportée à 1″ (*Ann. des Mines*, t. XIII, 1838).

L'anémomètre de M. Combes paraît donner avec une grande approximation les vitesses comprises entre un demi-mètre et 5 ou 6 mètres, peut-être même 10 mètres. La formule ne serait sans doute pas la même s'il s'agissait de grandes vitesses; mais l'on pourrait peut-être, pour celles-ci, faire un appareil moins délicat, qui commencerait seulement à marquer les vitesses quand elles atteignent 3 ou 4 mètres.

117. La formule de Bernouilli ne s'applique, comme nous l'avons dit, que pour des orifices de petites dimensions, par rapport au réservoir, percés en minces parois, ou munis d'ajutages assez courts. Nous ajouterons de plus qu'elle est restreinte au cas où la différence des pressions ne s'élève pas à plus de 10 centimètres de mercure. Quand les gaz s'écoulent par de longs tuyaux, il faut employer d'autres formules beaucoup plus compliquées, dans lesquelles entrent les longueurs et les diamètres des conduites. Quand les différences de pression deviennent considérables, même pour des orifices en mince paroi et de petites dimensions, il faut aussi recourir à d'autres formules, et il est peu probable que l'on arrive dans ce cas à des expressions générales. C'est du moins ce que semble indiquer un travail remarquable qui a été fait sur ce sujet par MM. Barré de Saint-Venant et Wantzel (*Journal de l'école Polytechnique*, t. XVI,

1839). Il résulte, en effet, des expériences faites avec beaucoup de soin par ces deux habiles observateurs, que de l'air pris à la pression ordinaire et rentrant dans le vide, n'a pas plus de vitesse que s'il rentre dans un réservoir où il y a une pression comprise entre 0 et 30 centimètres de mercure. Il semble donc qu'il y ait, du moins pour ce cas, une vitesse maximum, et elle s'élève seulement à 158 mètres si l'orifice est en mince paroi, à 178 mètres s'il est évasé *en amont*, et à 192 mètres s'il est évasé *en amont* et *en aval*. Ces vitesses étant, comme nous l'avons remarqué plus haut, les *vitesses réduites*.

Ces résultats font voir que la formule de Bernouilli n'est plus applicable quand la différence des pressions s'élève seulement à 10 ou 12 centimètres de mercure, puisqu'elle donne alors des vitesses de 130 à 150 mètres, tandis que les expériences de MM. de Saint-Venant et Wantzel indiquent tout au plus une centaine de mètres pour les mêmes pressions.

Il est fort à souhaiter que ces expériences soient reprises pour être appliquées à d'autres gaz, comme l'hydrogène, et à d'autres pressions, comme celle des fusils à vent; car il paraît bien impossible qu'un fluide donne à un projectile une vitesse supérieure à celle qu'il possède lui-même; et il paraît que, dans les fusils à vent ordinaires, la vitesse des projectiles peut dépasser 300 mètres.

La vitesse réelle des molécules serait donc incomparablement plus grande que la vitesse réduite; mais la liaison qui existe entre elles resterait à déterminer, car il ne paraît pas qu'elle soit représentée fidèlement par la théorie ingénieuse et remarquable à laquelle Navier avait été conduit (voy. *Mém. de l'Acad. des sciences*, 1830, et le travail cité plus haut de MM. de Saint-Venant et Wantzel).

118. Machines soufflantes. — On emploie pour les hauts fourneaux et les grands feux de forge dont nous avons parlé plus haut, des machines soufflantes de formes très-différentes. Nous avons représenté (Pl. 7, Fig. 15) celle qui est maintenant adoptée dans les meilleures usines : *cc* est un cylindre de fonte alésé; *p*, un piston dont la tige *t* passe dans une boîte à étoupe *d*; le fond supérieur et le fond inférieur du cylindre portent latéralement chacun deux soupapes, *a*, *b'* et *a'*, *b*. Les deux soupapes *a* et *a'* sont les *soupapes d'aspiration;* elles s'ouvrent de dehors en dedans; les deux soupapes *b* et *b'* sont les *soupapes*

d'expiration; elles s'ouvrent de dedans en dehors. Une roue hydraulique, ou une machine à vapeur, imprime le mouvement de va-et-vient au piston. On voit que, pendant la descente, les soupapes *a* et *b* sont seules ouvertes, la première pour aspirer, et la seconde pour expirer; c'est le contraire pendant l'ascension. L'air expiré et comprimé est recueilli dans le tuyau *gh*, pour être de là conduit au foyer.

Le *soufflet d'appartement* (Fig. 16) est, en quelque sorte, plus compliqué que la machine à piston; cependant, d'après ce que nous venons de dire, on peut aisément se rendre compte de ses effets : quand on écarte les deux ailes *m* et *m'*, on diminue la pression de l'air en agrandissant l'espace; alors la pression atmosphérique l'emporte; elle soulève la soupape *s'*, qui n'est autre chose qu'une bande de cuir collée par un bord, et appliquée sur l'ouverture ou l'*âme du soufflet;* en même temps la soupape *s* reste fermée par l'effet de la pression de l'air contenu dans le deuxième compartiment qui communique avec la douille *d*. Au contraire, quand on rapproche les ailes l'air se comprime, ferme la soupape *s'*, et ouvre la soupape *s* pour passer dans le deuxième compartiment, et de là s'écouler.

Le soufflet de maréchal n'est autre chose qu'un grand soufflet d'appartement.

119. Des pressions latérales des gaz pendant l'écoulement. — Il se produit, dans les grandes souffleries des forges, un phénomène remarquable qui a été décrit par Clément-Désormes (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXVI, p. 69). Une ouverture de 5 ou 6 centimètres de diamètre étant faite dans la paroi *plane* d'un réservoir d'air comprimé, l'air s'échappe avec une grande violence; mais, si on en approche un disque de bois ou de métal d'environ 20 centimètres de diamètre, et qu'après avoir vaincu la première résistance, on l'applique sur l'ouverture, il n'est plus repoussé comme auparavant; il oscille vivement, en s'éloignant ou en se rapprochant de l'ouverture dans des limites étroites, comme s'il était alternativement attiré et repoussé; l'air continue à s'échapper avec grand bruit, entre la surface du disque et celle de la paroi; et, si alors on voulait retirer le disque, il faudrait un grand effort : quoique séparé de la paroi, il semble collé contre elle. Clément-Désormes donne de ce phénomène une explication qui semble tout à fait conforme aux principes du mouvement des fluides. La veine qui sort de l'ouverture

doit s'épanouir en lame très-mince pour passer entre le disque et la paroi (Fig. 23); son épaisseur restant la même, elle doit s'élargir à mesure qu'elle approche de la circonférence du disque; ainsi elle se trouve dans le même cas que la veine fluide qui doit remplir un cône dont les sections deviennent toujours croissantes; de là une espèce de succion toute pareille aussi à celle que l'on observe dans les ajutages coniques.

LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

Notions générales.

120. L'air, l'eau et les différents corps de la nature peuvent exciter en nous des sensations particulières, que l'on appelle sensations de *chaleur* ou de *froid*. Ces affections se produisent au contact immédiat ou à de grandes distances, et elles sont d'une telle nature, que nous ne pouvons pas en attribuer la cause à la substance propre des corps. En présence d'un foyer allumé, nous jugeons facilement que ce n'est pas la matière du charbon qui vient sous forme invisible nous toucher et nous réchauffer; et quand nous recevons les rayons solaires, nous jugeons de même que ce n'est pas la matière pondérable du soleil qui descend vers la terre, pour produire sur nos yeux l'impression de la lumière, et sur toutes les parties sensibles de notre organisation l'impression de la chaleur. Il y a donc un *agent* qui est distinct de la substance propre des corps, qui est engagé dans leur masse, qui s'en échappe, qui se transmet à distance, qui établit une communication continuelle entre eux et nous, et qui est la *cause* des sensations de chaleur ou de froid que nous éprouvons. Cet agent a reçu différents noms. D'abord, confondant la cause avec l'effet, on l'a appelé *chaleur;* ensuite, par des notions plus justes sur son mode d'existence, on l'a nommé *fluide igné*, *matière du feu*, etc.; enfin, à la réforme de la nomenclature chimique, Lavoisier, Berthollet, Morveau et Fourcroy l'ont appelé *calorique*. Cette dénomination a été adoptée par tous les physiciens, et l'on a conservé le mot *chaleur* pour désigner la science qui traite des propriétés, des effets et des lois du calorique.

Cependant on ne s'en tient pas toujours à ces strictes définitions : il arrive souvent que le mot *chaleur* est employé pour désigner l'agent lui-même qui produit les phénomènes, et que

le mot *calorique* est aussi employé pour désigner l'ensemble de nos connaissances sur ces phénomènes et sur leurs lois.

121. Le calorique n'agit pas seulement sur les corps organisés, mais il agit aussi sur les corps inorganiques. La glace peut fondre, l'eau peut entrer en ébullition, le fer peut rougir au feu; tous ces phénomènes et tant d'autres de même espèce ont nécessairement une cause, et nos sens nous avertissent que cette cause est le calorique. Il y a une telle correspondance, une telle simultanéité entre ces modifications qui surviennent dans les corps et les changements qui surviennent dans nos sensations, que nous craignons peu de nous tromper en portant ce jugement. Ces seules indications peuvent nous servir à classer les phénomènes du calorique, et à établir d'avance l'ordre dans lequel nous devons en faire l'étude.

Nous diviserons la théorie de la chaleur en *deux parties*. La *première partie* aura pour objet les *deux effets physiques* que le calorique produit dans les corps, savoir: 1° les *changements de volume* ou la dilatation; et 2° les *changements d'état* ou le passage de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état de vapeur.

La *seconde partie* aura pour objet : 1° la *propagation du calorique*, qui comprend la *conductibilité* ou la propagation au contact, et le *calorique rayonnant* ou la propagation à distance; 2° la *calorimétrie* ou la mesure des quantités de calorique qui sont nécessaires pour produire des effets déterminés.

Nous essayerons d'abord de donner une première idée des phénomènes qui servent de base à ces divisions de la théorie de la chaleur. Ces indications générales sont d'autant plus nécessaires que nous ne pourrons traiter de la deuxième partie de la chaleur qu'après avoir vu l'optique.

122. Changements de volume. — Nous avons vu (**13**) que le calorique *dilate* tous les corps, que le volume d'un corps quelconque dépend du degré de chaleur qu'il éprouve, et que, toutes choses égales d'ailleurs, le même degré de chaleur lui donne toujours exactement le même volume. Nous devons maintenant donner quelques développements et quelques exemples pour mieux faire comprendre cette proposition générale.

Pour montrer la dilatation des *corps solides*, on peut employer l'appareil représenté (Pl. 8, Fig. 26), *t* est la tige soumise à l'expérience; l'une de ses extrémités vient butter contre

la vis *v*, tandis que l'autre extrémité reste libre et s'appuie contre le levier mobile *ab*, très-près de son point fixe *a*; ce levier vient à son tour s'appuyer contre l'aiguille *g*, très-près aussi de son centre de rotation, et fait parcourir à son extrémité un espace plus ou moins grand sur le cadran *c*. Un ressort *r*, convenablement disposé, maintient tous ces contacts, soit que la tige s'allonge par la chaleur, soit qu'elle se contracte par le refroidissement. Un réservoir à esprit-de-vin, formant lampe, sert à chauffer la tige.

Quand les allongements sont assez amplifiés par la combinaison des leviers, il suffirait de transporter l'appareil d'un appartement plus froid dans un appartement plus chaud, ou *vice versa*, pour observer des mouvements très-sensibles de l'aiguille sur les divisions du cadran.

Ces effets ne se manifestent ici que sur la longueur de la tige, mais il est facile de comprendre qu'ils se produisent pareillement dans toutes ses dimensions.

La lenteur des mouvements de l'aiguille nous montre, de plus, que la chaleur ne pénètre les corps que lentement, peu à peu et de proche en proche.

Voici une expérience qui démontre cette vérité d'une manière encore plus frappante. *a* (FIG. 9) est un ballon de verre d'un tiers ou d'un quart de litre auquel on a soudé un tube de 2 ou 3 millimètres de diamètre intérieur; il est rempli d'eau, d'huile ou d'alcool, et le sommet de la colonne liquide, au degré de chaleur où l'on opère, doit être à peu près vers le milieu de la hauteur du tube.

Si l'on plonge rapidement ce ballon dans de l'eau chaude, pour le retirer à l'instant, on voit que la colonne liquide s'abaisse d'abord notablement pour s'élever ensuite au-dessus de sa hauteur primitive. La raison en est simple : la première impression de la chaleur se fait sentir d'abord à l'enveloppe de verre qui contient le liquide, elle la dilate et en augmente la capacité, ce qui fait descendre la colonne; mais bientôt cette chaleur de l'enveloppe passe dans le liquide lui-même, pour le dilater à son tour; et comme sa dilatation est plus grande que celle du verre, son augmentation de volume ne tarde pas à surpasser l'augmentation de capacité du vase, et le sommet de la colonne liquide revient au point de départ, et le dépasse rapidement.

à la même température. Ainsi, en prenant dans la paume des mains un des thermomètres précédents, on le verra monter plus ou moins, suivant que l'on aura les mains plus chaudes ou plus froides. Mais si l'on a la patience d'attendre et de tenir les mains pressées jusqu'à ce qu'elles se soient réchauffées le plus possible, on verra le thermomètre qu'elles tiennent enfermé monter lentement jusqu'à une certaine limite, où il arrivera toujours, et qu'il ne dépassera jamais. Dans toutes les saisons, sous tous les climats et chez tous les individus, il s'arrêtera au même point ou à très-peu près. Ainsi la température du corps humain est une température constante, et elle offre un point *fixe*, que l'on pourrait prendre pour point de départ dans l'évaluation numérique des températures. Cependant il y a d'autres phénomènes qui sont plus mathématiquement constants, et auxquels il est plus simple de recourir : tels sont, par exemple, les changements d'état des corps.

123. Changements d'état. — La plupart des corps solides peuvent passer à l'état liquide : ainsi la glace se fond et donne naissance à de l'eau qui a la même composition chimique que la glace elle-même, c'est seulement un autre état d'agrégation des molécules : il en est de même de la cire, du plomb, de l'or, du fer, etc. ; ces corps sont appelés corps fusibles, parce que leurs éléments matériels, sans être séparés ou modifiés chimiquement, peuvent prendre l'état liquide sous l'influence de la chaleur, et revenir ensuite à l'état solide.

La plupart des corps liquides peuvent passer à l'état de vapeur ou de fluide élastique : ainsi, quand on fait bouillir de l'eau dans un vase, la masse d'eau diminue rapidement, et cependant les molécules d'eau qui semblent disparaître ne sont ni détruites ni modifiées chimiquement ; elles prennent l'état de vapeur, c'est-à-dire qu'elles forment alors un fluide élastique analogue à l'air ; et si cette vapeur est recueillie et refroidie, elle reproduit exactement tout le poids d'eau qui avait disparu. Il en est de même de l'alcool, de l'éther, du mercure, du zinc, du sel ordinaire, etc.

Pour produire ces changements d'état, c'est-à-dire pour *fondre* ou pour *vaporiser* les corps, il faut leur donner une certaine température. Or, on a observé d'abord ce fait fondamental, qu'un même corps se fond toujours exactement à la même température : ainsi, dans la *glace fondante*, un thermomètre revient

toujours exactement au même point, soit que cette glace ait été formée artificiellement, soit qu'elle ait été formée naturellement au-dessus des montagnes, sur les rivières ou sur les mers. Il en est de même de la cire, du plomb, etc. Chaque corps a son point de fusion qui est parfaitement fixe.

On a observé ensuite qu'il en est de même du *point d'ébullition;* ainsi, quand l'eau bout avec force, en poussant le feu plus vivement on arrive à la faire bouillir plus vite, mais non pas à la chauffer davantage ; le thermomètre reste au même point parfaitement immobile : il en est de même des autres liquides, chacun a son point particulier d'ébullition. Nous devons ajouter, toutefois, que pour chaque liquide le point d'ébullition change avec la pression que supporte la surface du liquide, et qu'il change par conséquent avec la hauteur du baromètre ; mais, pour la même pression, le point d'ébullition est fixe.

Concevons maintenant que l'on prenne deux points fixes, celui de la glace fondante, par exemple, et celui de l'eau bouillante, et que, les ayant marqués l'un et l'autre sur la tige du thermomètre, on divise en cent parties égales l'intervalle qui les sépare, et que l'on continue les divisions au-dessus et au-dessous des points extrêmes : on aura ainsi un *thermomètre gradué*, qui s'appelle *thermomètre centésimal*. Le *zéro* ou le commencement de l'échelle se met au point de la glace fondante, et les divisions qui sont au-dessous du zéro se distinguent par le signe *moins :* ainsi, — 10°, — 20° signifient dix degrés, vingt degrés au-dessous de la glace fondante.

124. Propagation du calorique. — Le calorique se propage d'un corps à l'autre, soit au contact, soit à distance au travers de l'air et des différents autres milieux.

Au contact, il se répand de proche en proche, jusqu'aux molécules les plus intérieures des corps. Au feu de forge, par exemple, les pièces de fer sont d'abord échauffées à leur surface, puis le calorique gagne peu à peu, et pénètre enfin toute l'étendue de la masse qui est enveloppée de feu. Cette propagation intérieure du calorique est ce que l'on appelle la *conducibilité* ou la *conductibilité ;* elle est plus ou moins rapide, suivant la nature des corps. On nomme *bons conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer facilement par la chaleur, et qui prennent rapidement la température qu'ils doivent avoir ; et *mauvais conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer moins facilement, et

qui sont plus lents à se mettre en équilibre de température dans toutes leurs parties. Les métaux sont en général de bons conducteurs.

Le verre, le soufre, le charbon, les pierres de différentes espèces, toutes les substances végétales et animales sont en général de mauvais conducteurs; les liquides et les gaz sont les plus mauvais conducteurs que l'on connaisse.

A distance, le calorique se propage à peu près comme la lumière ; il traverse le vide avec une grande vitesse, comme la lumière traverse les espaces célestes ; il passe dans certains corps sans s'y arrêter, sans les rendre chauds, à peu près comme la lumière passe dans le verre, sans s'y éteindre et sans le rendre lumineux. Ce mode de propagation est ce que l'on appelle le *rayonnement du calorique :* c'est par rayonnement que le calorique du soleil arrive à la terre ; c'est aussi par rayonnement qu'un foyer nous échauffe à travers les couches d'air qui nous séparent de lui, et qu'un corps très-peu chaud nous fait sentir sa présence, même à une assez grande distance. Le *calorique rayonnant* devient du calorique ordinaire, lorsqu'il est absorbé par les corps et qu'il se répand par la conducibilité dans les différentes parties de leurs masses ; et réciproquement, le calorique qui s'échappe des corps à mesure qu'ils se refroidissent, s'échappe sous la forme de calorique rayonnant, à moins qu'il ne rencontre immédiatement des corps qui l'absorbent et dans lesquels il ne puisse passer que de molécule à molécule.

125. Calorimétrie. — La calorimétrie comprend : 1° le calorique spécifique; 2° le calorique latent; 3° la mesure des quantités de chaleur qui sont données ou absorbées par les différentes sources de chaleur ou de froid.

Le *calorique spécifique* d'un corps est le nombre des unités de chaleur que 1 kilogramme de ce corps exige pour que sa température s'élève de 1°. L'*unité de chaleur* étant conventionnelle comme toutes les unités dont on se sert pour estimer numériquement les grandeurs, on est convenu de prendre pour unité de chaleur la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de 1° au-dessus de 0 la température de 1 kilogramme d'eau ; car cette quantité est toujours constante. Ainsi, quand on dit que le calorique spécifique du mercure est $\frac{1}{30}$, cela signifie que pour élever de 1° la température de 1 kilogramme de mer-

cure, il ne faut que $\frac{1}{30}$ de la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de 1° la température de 1 kilogramme d'eau. *Capacité pour la chaleur* et *calorique spécifique* sont deux expressions synonymes ; la première semble mieux indiquer que la quantité de chaleur nécessaire pour produire dans un corps un changement de température déterminé est tout à fait dépendante de la substance propre du corps, et qu'elle est plutôt une propriété de cette substance elle-même qu'une propriété du calorique.

Le *calorique latent* d'un corps est le nombre des unités de chaleur que ce corps absorbe ou dégage au moment où il change d'état. Il est nécessaire d'en citer ici un exemple pour faire bien comprendre cette définition : 1 kilogramme de glace à la température de *zéro*, et 1 kilogramme d'eau à la température de 80°, donnent, après leur mélange et après la fusion complète de la glace, 2 kilogrammes d'eau à la température 0. Ainsi la glace a été fondue, mais elle n'a pas changé de température ; l'eau chaude à 80° est restée liquide, mais elle s'est refroidie jusqu'à la température de la glace. Donc le kilogramme de glace, *pour se fondre*, a *absorbé* tout le calorique qu'a perdu le kilogramme d'eau, en descendant depuis 80° jusqu'à 0 ; il l'a absorbé pour se fondre, puisque sa température n'a pas changé. Le calorique absorbé et comme dissimulé dans la masse liquide qui résulte de la fusion est le *calorique latent* ou le *calorique de fusion*. L'eau en se congelant reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *solidification*, tout le calorique qu'elle avait absorbé pendant sa fusion ; c'est-à-dire que 1 kilogramme de glace à 0 et 1 kilogramme d'eau à 0 n'ont pas la même quantité de chaleur, quoique étant à la même température ; l'eau en a plus que la glace, et ce qu'elle en dégage pendant qu'elle se congèle serait capable d'élever un autre kilogramme d'eau de 0 à 80 degrés.

Le même phénomène se produit dans le passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Au moment de sa formation, la vapeur se trouve à la même température que le liquide qui lui donne naissance : mais, à poids égal, elle a beaucoup plus de calorique ; car elle en absorbe, à mesure qu'elle se forme, bien plus encore que la glace n'en absorbe à mesure qu'elle se fond. Ce calorique absorbé et dissimulé dans la masse gazeuse de la vapeur s'appelle encore *calorique latent*, et quelquefois *calo-*

rique de vaporisation ou *calorique d'élasticité*. Quand la vapeur revient à l'état liquide, elle reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *condensation*, toute cette quantité de calorique qu'elle avait dû prendre pendant sa formation.

Ces absorptions de calorique en proportions différentes, pendant la fusion et la vaporisation, et les reproductions égales pendant la solidification et la condensation se manifestent nécessairement dans tous les corps. Le phénomène de la chaleur latente est une condition essentielle des changements d'état.

Les sources de chaleur et de froid dégagent et absorbent des quantités de chaleur qui peuvent être mesurées et exprimées numériquement comme le calorique spécifique et le calorique latent; pour le comprendre, il suffit de jeter un coup d'œil sur les phénomènes naturels et d'examiner les causes générales de réchauffement et de refroidissement. En effet, le calorique peut être accumulé dans les corps, mais il ne peut pas y être retenu et enfermé, comme l'air, l'eau et les autres fluides pondérables sont enfermés dans les vases. Aucune substance n'est impénétrable au calorique : c'est un fluide *incoercible* qui est sans cesse en mouvement pour se communiquer de proche en proche dans les corps contigus, ou pour se répandre dans l'espace sous forme rayonnante. Si un corps chauffé au rouge, tel qu'un boulet, par exemple, était enfoncé à 10 mètres sous terre, tout le monde sait que sa chaleur se communiquerait aux couches environnantes, puis de celles-ci aux suivantes, et ainsi de proche en proche jusqu'à de très-grandes distances : après un temps assez long, ce boulet serait refroidi, mais aucune portion de sa chaleur ne serait perdue; elle serait répandue dans les corps voisins, et l'on pourrait, à la rigueur, la retrouver et la recueillir en totalité. Lorsqu'un corps se refroidit dans l'air, le phénomène est different : une portion de sa chaleur passe aux molécules d'air qui le touchent, mais une portion s'échappe sous forme rayonnante, à peu près comme la lumière s'échappe de la flamme; et ces rayons de calorique se répandant de toutes parts, les uns vont tomber sur des corps qui les arrêtent et les absorbent en partie, les autres s'élèvent vers le zénith, traversent toute l'épaisseur de l'atmosphère et vont se *perdre* dans le vide du ciel. Il y en a sans doute qui vont tomber sur le soleil et sur les corps célestes, comme il arrive aussi à la lumière d'une bougie de se

répandre jusqu'aux astres. Ce qui est vrai d'un corps suspendu dans l'air est vrai pareillement du globe entier de la terre, suspendu au milieu de l'espace. Ainsi, la terre se refroidit : à chaque instant, l'atmosphère et tous les corps terrestres qui sont exposés à l'aspect du ciel perdent de leur calorique par le rayonnement. Il faut donc qu'il y ait des sources de chaleur qui réparent à chaque instant les pertes que fait la terre, et qui puissent maintenir sur sa surface cette température moyenne dont l'intensité est une condition nécessaire des phénomènes de la végétation et des fonctions de la vie.

Nous verrons qu'il y a trois sources de chaleur pour compenser le refroidissement que la terre éprouve, et pour maintenir d'une manière à peu près permanente l'équilibre des températures terrestres.

La première est une chaleur primitive qui règne encore à de grandes profondeurs, et qui se dissipe peu à peu ; elle entretient les parties centrales de la terre à une chaleur sans doute plus grande que celle du fer fondu, mais elle ne contribue que dans une faible proportion aux températures de la surface.

La seconde est la chaleur solaire, dont nous donnerons la mesure dans les éléments de météorologie : nous verrons que tout le calorique que le soleil répand sur la terre dans le cours d'une année est capable de fondre une certaine quantité de glace que nous sommes parvenus à déterminer par des moyens simples et rigoureux.

La troisième source de chaleur est celle qui résulte des actions mécaniques et chimiques qui s'exercent sur la matière. Le simple contact des corps dégage de la chaleur : la compression, le frottement, la percussion, et tous les changements mécaniques que peuvent éprouver les molécules matérielles, dégagent pareillement de la chaleur et du froid. Enfin les combinaisons chimiques, soit les combinaisons naturelles qui accompagnent la naissance, le développement et la décomposition des êtres, soit les combinaisons accidentelles qui sont des produits de l'art, sont autant de phénomènes de production de chaleur ou de froid dont il importe de connaître les lois.

PREMIÈRE PARTIE.

CHANGEMENTS DE VOLUME ET CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS.

PREMIÈRE SECTION.

CHANGEMENT DE VOLUME.

CHAPITRE PREMIER.

Dilatation.

126. Construction du thermomètre à mercure. — La construction du thermomètre à mercure se réduit à un petit nombre d'opérations très-simples : il suffit de préparer le tube, d'introduire le liquide, de fermer le thermomètre et de le graduer.

Les tubes de thermomètre doivent avoir un diamètre intérieur qui soit partout le même, afin que des longueurs égales correspondent à des volumes égaux. Pour s'assurer de cette condition, on fait passer, dans l'intérieur du tube que l'on veut employer, une petite colonne de mercure de 1 ou 2 centimètres de longueur; ensuite, par une légère pression que l'on peut exercer avec une vessie de gomme élastique, on fait courir cette colonne d'un côté ou de l'autre, jusqu'à ce qu'elle ait parcouru toute l'étendue du tube en présence d'une échelle divisée (Pl. 8, Fig. 10). Si, dans chaque position, elle occupe la même longueur, on est très-sûr que le tube est cylindrique, et, pour l'employer à la construction d'un thermomètre, il ne reste plus qu'à y souffler une boule (Fig. 1), ou à y souder un réservoir cylindrique. Si, au contraire, elle occupe des longueurs inégales, il est nécessaire de *calibrer* le tube, c'est-à-dire de marquer sur toute sa longueur les intervalles plus ou moins grands qui cor-

respondent au volume constant de la colonne ou à des *capacités égales*.

Pour introduire le liquide, on chauffe le réservoir afin d'en dilater l'air, et ensuite on plonge rapidement l'extrémité du tube dans un bain de mercure. Le refroidissement qui a lieu diminue l'élasticité de l'air intérieur, et la pression atmosphérique force le liquide à monter de plus en plus; il suffit qu'il en arrive seulement quelques gouttes dans le réservoir (Fig. 3). Alors, retournant l'appareil pour le chauffer de nouveau jusqu'à l'ébullition du liquide, les vapeurs de mercure en remplissent bientôt toute la capacité; l'air est complétement chassé, et cette fois, en plongeant très-vite l'extrémité du tube dans le bain de mercure, on est presque assuré qu'il se remplira complétement.

Avant de fermer le thermomètre, on en *règle la course*, c'est-à-dire que l'on fait sortir ou rentrer du liquide jusqu'à ce que le sommet de la colonne corresponde à peu près à la hauteur que l'on veut choisir pour la température moyenne; ensuite on ferme à la lampe l'extrémité du tube. Cette opération se fait de deux manières : 1° en faisant le vide au-dessus de la colonne thermométrique, 2° en y laissant de l'air.

Dans le premier cas, on commence par effiler l'extrémité du tube, et, après cela, on chauffe la boule sur des charbons jusqu'au point de faire sortir une petite goutte de liquide. A cet instant même, on dirige le dard du chalumeau (Fig. 2) sur l'extrémité du bec effilé du tube; le verre se fond, et le tube est fermé : il ne reste plus qu'à l'arrondir, en le présentant au dard de la lampe, après que la colonne s'est retirée par le refroidissement.

Dans le second cas, le thermomètre étant à la température *ambiante*, c'est-à-dire à la température de l'air environnant, on présente l'extrémité du tube au dard de la lampe, et on la ferme hermétiquement; ensuite on la maintient rouge et à peu près en état pâteux pendant quelques instants, et alors, chauffant rapidement le réservoir, soit avec la main, soit avec une lampe, la colonne monte, l'air est repoussé, et, par la pression qu'il exerce au sommet du tube sur le verre fondu, il forme une espèce de réservoir *r* (Fig. 4) qui est plus ou moins grand, suivant que l'air y est refoulé avec plus ou moins de force. Ce réservoir supérieur est presque toujours nécessaire lorsqu'on laisse de l'air dans l'appareil.

La *graduation* du thermomètre consiste à marquer les *deux*

points fixes, et à diviser en parties égales l'intervalle qui les sépare. Les points fixes qui sont généralement adoptés sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante. Pour marquer le point de la glace fondante, on plonge dans un vase rempli de glace pilée (Fig. 4) le réservoir du thermomètre et toute la partie de la tige dans laquelle il se trouve du liquide. La température ambiante étant plus haute que 0, la glace fond peu à peu, et toute la masse se maintient à la température fixe de la glace fondante. Après quelques instants, le thermomètre a pris cette température; il reste parfaitement stationnaire, et l'on marque le point précis où il se trouve; on le marque sur le tube d'abord à l'encre, et ensuite on y fait un trait au diamant : c'est le 0 ou le point de départ de notre *échelle thermométrique*.

Pour marquer le point de l'ébullition, on prend un vase à long col (Fig. 5), dans lequel on fait bouillir de l'*eau distillée;* après quelques instants d'ébullition, la vapeur en a échauffé également toutes les parties, et elle s'échappe par les ouvertures latérales; alors, le thermomètre est enveloppé de toutes parts d'un bain de vapeur dont la température est partout la même et partout égale à la température de la première couche d'eau bouillante. Bientôt la colonne arrive à un point fixe qu'elle ne peut plus dépasser; c'est le point d'ébullition : on le marque d'abord à l'encre, et ensuite au diamant. Si, au moment de l'expérience, la hauteur du baromètre était sensiblement différente de 760^{mm}, il faudrait faire une correction dont nous donnerons la valeur en parlant de l'ébullition.

La forme du vase a une grande influence sur l'exactitude de la graduation; j'ai depuis longtemps adopté la disposition suivante (Fig. 5, 6, 7) : dans un vase circulaire de laiton, portant deux manettes de bois b et b', est fixé un vase de même forme, mais plus petit; celui-ci se ferme par un couvercle à rebords, surmonté du large tube elliptique, aussi en laiton, aa', et revêtu de drap, dont on voit la projection (Fig. 7). Après avoir mis un peu d'eau distillée au fond du vase (Fig. 6) et ajusté le couvercle, on remplit de sable le grand vase de laiton, et on place tout l'appareil sur un fourneau pour déterminer une ébullition assez rapide. Le haut du tube elliptique est disposé pour recevoir au moins deux thermomètres, afin de faire des graduations simultanées, et de comparer aussi des thermomètres gradués à diverses époques.

L'intervalle des deux points de la glace fondante et de l'eau bouillante est divisé en 100 degrés ou en 100 parties d'égale capacité; les divisions sont continuées au-dessus et au-dessous de ces points, et leur ensemble forme l'*échelle thermométrique.*

Quand le tube a été reconnu exactement cylindrique, il suffit de le mettre sur une machine à diviser, de compter le nombre des tours de vis nécessaires pour parcourir tout l'espace compris entre les points de glace fondante et d'eau bouillante, d'en prendre la centième partie, qui représente alors le nombre des tours et de fractions de tours qu'il faut faire en partant de zéro, pour que le diamant arrive aux points successifs où il doit faire ses traits de 1°, 2°, etc.

Quand le tube n'a pas été reconnu cylindrique, il a été *calibré*, c'est-à-dire divisé, par exemple, en 20 parties de capacités égales, dont chacune peut être regardée comme cylindrique. On estime d'abord combien il y a de ces capacités entre les points de glace et d'ébullition, soit, par exemple, 15,75; chaque degré correspond donc à 0,1575 de l'une de ces parties; on sait d'ailleurs que la première, celle dans laquelle se trouve le zéro, correspond à n tours de la machine à diviser; la deuxième à n' tours, etc. Ainsi, en partant du zéro, il faudra faire un nombre de tours $0{,}1575n$ pour arriver à 1°; puis, quand on sortira de cette capacité pour passer à la suivante, il faudra, pour chaque degré ou fraction de degré, faire un nombre de tours à raison de $0{,}1575n'$ pour chaque degré, etc.

Tous les thermomètres à mercure, construits d'après ces principes, sont des instruments *comparables*, c'est-à-dire qu'ils marchent ensemble et indiquent en même temps le même nombre de degrés. En effet, deux volumes d'un même corps étant pris à 0, si on les porte à une autre température, de telle sorte que l'un d'eux se dilate, par exemple, de la millième partie de son volume à 0, l'autre se dilatera aussi de la millième partie de son volume à 0; par conséquent, deux thermomètres à mercure doivent marquer en même temps 1°, 2°, 3°, etc., parce qu'ils doivent prendre en même temps le centième, les 2 centièmes, les 3 centièmes, etc., de l'accroissement de volume qu'ils sont susceptibles de prendre en passant de 0 à 100°.

Cependant ce raisonnement n'est vrai qu'en supposant le mercure contenu dans des vases ou dans des enveloppes solides de même nature : car, dans les thermomètres, ce n'est pas la *dila-*

tation absolue du mercure que l'on observe, mais sa *dilatation apparente*, c'est-à-dire la différence qui existe entre l'accroissement de volume du mercure et l'accroissement de capacité de l'enveloppe qui le contient. Si le verre se dilatait autant que le mercure, le thermomètre resterait stationnaire à toutes les températures, et même, si l'enveloppe du verre se dilatait plus que le liquide qu'elle contient, les augmentations de chaleur feraient baisser le thermomètre au lieu de le faire monter. Pour que les thermomètres soient rigoureusement comparables, il faut donc que leurs enveloppes soient également dilatables.

On peut construire des thermomètres à mercure qui marquent jusqu'à 350 degrés, mais il est impossible de les faire aller plus loin, parce que cette température est voisine du point d'ébullition du mercure. Au-dessous de zéro, le thermomètre à mercure ne donne des indications justes que jusqu'à — 30 ou — 35°; car il approche alors de son point de congélation, qui est vers — 40°, et, près du changement d'état, tous les corps éprouvent des modifications brusques.

Pour les recherches, et même pour les observations auxquelles on veut donner quelque exactitude, il convient d'employer des thermomètres qui n'aient que 15 ou 20 degrés de course : l'un marquant, par exemple, les températures depuis + 10 à — 5; un autre de — 5 à — 20; un autre de + 10 à + 25, etc.; alors, les réservoirs ne contiennent que très-peu de mercure, les tubes sont d'un diamètre intérieur excessivement fin, et chaque degré occupe une grande longueur. Ces thermomètres ont le double avantage de prendre rapidement la température, et de l'indiquer avec une grande précision. Pour les graduer, il est nécessaire d'avoir un *thermomètre-étalon*, c'est-à-dire un thermomètre gradué à la glace fondante et à l'eau bouillante, et de l'exactitude duquel on soit parfaitement assuré. Ces graduations partielles, ainsi que la comparaison des grands thermomètres à divers points de l'échelle, se font très-facilement, au moyen de l'appareil représenté figure 8, qui n'est autre chose qu'un vase à double enveloppe non conductrice, et d'une profondeur suffisante, dans lequel on plonge les thermomètres à graduer ou à comparer. Ils sont portés par des pinces qui s'élèvent et s'abaissent à volonté. Le liquide est porté à la température voulue, et brassé au moyen d'un agitateur dont le manche est en *a*; une cloison *c*, ouverte en haut et en bas, sert à déterminer une com-

plète circulation du liquide. (Voy. la Météorologie pour les thermomètres à maxima.)

On a observé qu'en général le 0 des thermomètres se déplace avec le temps, comme si le réservoir devenait plus petit. Mais M. Despretz a fait une autre remarque non moins importante : c'est que ce déplacement est déterminé aussi par des variations brusques de température. Ainsi, dans un thermomètre abandonné à lui-même, le zéro s'élève progressivement pendant trois ou quatre ans, et son ascension totale peut dépasser un demi-degré ; et dans un thermomètre qui est employé à mesurer des températures très-différentes, des variations du zéro peut-être plus étendues peuvent se montrer dans l'espace de quelques heures, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, suivant que le thermomètre a été refroidi ou chauffé.

Le thermomètre de Réaumur, qui est encore en usage en France, et le thermomètre de Fahrenheit, qui est exclusivement adopté en Angleterre et en Allemagne, se divisent autrement que le thermomètre centigrade.

Le therm. de Réaumur marque 0 à la glace et 80° à l'ébullition.
Le therm. de Fahrenheit marque 32 à la glace, 212° à l'ébullition.

Ainsi, en multipliant les degrés de Réaumur par $\frac{5}{4}$, on les transforme en degrés centigrades, et, réciproquement, en multipliant les degrés centigrades par $\frac{4}{5}$, on les transforme en degrés de Réaumur; pareillement, une température étant donnée en degrés de Fahrenheit, il suffit d'en retrancher 32 et de multiplier le reste par $\frac{5}{9}$ pour la transformer en température centigrade.

127. Formules de dilatation. — Quand un corps se dilate par la chaleur ou se contracte par le froid, il ne faut pas confondre l'*allongement*, qui s'opère dans une seule dimension, avec l'*accroissement de volume* qui s'opère dans les trois dimensions; l'un donne la *dilatation linéaire*, l'autre la *dilatation cubique*.

L'allongement *absolu* b qu'une barre métallique éprouve, en passant de la température 0 à la température t, dépend à la fois de sa longueur primitive l et de la température t à laquelle on la porte; mais son allongement *relatif* $\frac{b}{l}$ ne dépend plus que de la

température; c'est cet allongement relatif que l'on appelle la dilatation.

Le *coefficient de dilatation linéaire*, que nous désignerons par n, est le rapport de la dilatation à l'intervalle t de température auquel elle correspond, en partant de 0; l'on a donc d'après cette définition,

$$n = \frac{b}{tl}; \quad \frac{b}{l} = nt; \quad b = ntl.$$

L'expérience démontre les faits suivants pour les métaux, et en général, pour les corps solides :

1° n varie d'une substance à l'autre, ses valeurs sont 0,000008 ou 8 millionièmes de la longueur à 0 pour le platine et 0,000031 ou 31 millionièmes pour le zinc; l'un étant le moins dilatable, l'autre le plus dilatable des métaux.

2° n est constant, pour le même corps, quand la température t ne s'élève pas de beaucoup au-dessus de 100°; c'est ce que l'on exprime en disant que, entre ces limites, la dilatation est uniforme, ou qu'elle est proportionnelle à la température, et que l'allongement absolu est à la fois proportionnel à la température et à la longueur à 0.

3° Quand on dépasse ces limites n est variable, et devient en général d'autant plus grand que la température est plus élevée; la valeur qu'il prend alors s'appelle le coefficient *moyen* de dilatation linéaire, pour la température t correspondante. Ainsi, entre 0 et 100°, le coefficient de dilatation linéaire du verre est de 8 millionièmes, comme celui du platine, soit qu'on le calcule pour des températures de 10°, de 20°, de 90° ou de 100°; mais pour 200° il devient 9 millionièmes, et pour 300° il devient 10 millionièmes; ces nombres étant les coefficients moyens pour 200° et pour 300°.

D'après cela, l' étant la longueur à la température t, on a évidemment

$$l' = l + b, \quad \text{ou} \quad l' = l + ntl, \quad \text{ou} \quad l' = l(1 + nt);$$

de même, l'' étant la longueur à la température t', on a pareillement

$$l'' = l(1 + nt'),$$

pourvu que t et t' soient compris entre les limites où n est constant. Alors en éliminant l on en tire

$$l'' = l'\left(\frac{1+nt'}{1+nt}\right),$$

ou approximativement

$$l'' = l'[1+n(t'-t)],$$

en négligeant le carré de n qui est toujours très-petit par rapport à n.

Cette équation contient cinq quantités : deux longueurs, les deux températures correspondantes, et le coefficient de dilatation; quatre de ces quantités étant connues, l'on peut toujours trouver la cinquième.

Les définitions précédentes s'appliquent à la *dilatation cubique;* ainsi v étant le volume d'un corps à 0, c l'accroissement *absolu* de volume qu'il prend en passant à la température t, m son *coefficient de dilatation cubique*, on a $\frac{c}{v}$ pour l'accroissement *relatif* de volume qui s'appelle aussi la dilatation cubique, et $\frac{c}{vt}$ pour le coefficient de dilatation cubique, ce qui donne

$$m = \frac{c}{vt}, \quad c = mvt.$$

En désignant par v' le volume qui correspond à la température t, on a donc

$$v' = v + c, \quad \text{ou} \quad v' = v + mvt, \quad \text{ou} \quad v' = v(1+mt);$$

en désignant par v'' le volume qui correspond à une autre température t', on a de même

$$v'' = v(1+mt');$$

ou, en éliminant v,

$$v'' = v'\left(\frac{1+mt'}{1+mt}\right);$$

et approximativement en négligeant le carré de m par rapport à m,

$$v'' = v'[1+m(t'-t)],$$

relation analogue à celle de la dilatation linéaire.

Ajoutons de plus que le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire, du moins pour les corps qui se dilatent également dans toutes leurs dimensions. En effet l étant le côté d'un cube à la température 0, et v son volume, on a $v = l^3$; à la température t le volume devient $v(1+mt)$ et l'arête prend une longueur $l(1+nt)$, ce qui donne

$$v(1+mt) = l^3(1+nt)^3 = l^3(1+3nt+3n^2t^2+n^3t^3),$$

ou, en négligeant les termes qui contiennent n^2 et n^3,

$$v(1+mt) = l^3(1+3nt);$$

ou $$1+mt = 1+3nt, \quad \text{ou enfin} \quad m = 3n.$$

Il suffit donc de chercher l'un de ces coefficients pour arriver ensuite à connaître l'autre.

128. Dilatation des corps solides. — Appareil de Lavoisier et Laplace. — Les barres ou règles r soumises à l'expérience avaient deux mètres de longueur et étaient horizontalement suspendues dans une chaudière a (Fig. 27), établie sur un fourneau. Quatre blocs de pierre b, de grandes dimensions, établis sur une maçonnerie solide, servaient à prendre des points d'appui parfaitement fixes; ils étaient réunis deux à deux par des traverses de fer c et c', d, d' et e; à chacune des deux premières étaient attachées des bandes de glace, portant à leur partie inférieure des rouleaux de verre, sur lesquels était posée la règle; contre les traverses d et e, était fixée, de champ, une autre bande de glace très-forte, contre le tranchant de laquelle venait s'appuyer l'extrémité fixe de cette règle; tandis que son extrémité libre agissait contre le levier mobile f, qui faisait ainsi tourner la traverse d', et par suite le levier g et la lunette h. Le bain de la chaudière et la règle étant à 0, et les contacts bien établis, la lunette visait à 200 mètres de distance sur une mire m verticale et soigneusement divisée; ce point de départ une fois noté, on chauffait, par exemple, à 100° : alors la règle soumise à l'épreuve s'allongeant plus ou moins selon sa nature, les leviers f et g et la lunette h se mettaient en mouvement, pour s'arrêter quand l'effet de la dilatation, pour cette température, était complétement produit. Connaissant les rapports des bras de levier f et g, ainsi que le rapport des distances ik et im, il était facile de calculer l'allongement de la règle, au moyen de l'espace connu qui avait été parcouru sur la mire.

L'*appareil de Ramsden* est venu quelques années après le pré-

cédent (*Trans. phil.*, 1785); il a principalement pour objet d'éviter toute espèce de contact, car c'est en général par l'imperfection des contacts que pèchent la plupart des appareils de ce genre. Il est représenté figure 18; il se compose de trois auges parallèles *a*, *b*, *c*; c'est dans l'auge du milieu *b* que se trouve la règle soumise à l'épreuve; mais cette règle doit porter à chaque bout des appendices verticaux sortant du liquide, et destinés à recevoir chacun un objectif de microscope. Les deux auges *a* et *b* sont maintenues à la glace fondante, dans toutes les expériences; elles contiennent aussi des règles semblables à la précédente, mais qui restent les mêmes dans toutes les épreuves; les appendices de celle qui est dans l'auge *c* portent des fils croisés, tandis que les appendices de celle qui est dans l'auge *a* portent des oculaires; de telle sorte qu'après avoir bien disposé l'appareil, et tout étant à la température 0, on a deux microscopes montés chacun sur l'une des extrémités des trois règles; l'oculaire sur la première, l'objectif sur la deuxième, et les fils croisés, formant le foyer, sur la troisième. Si l'on porte à 100° la règle d'épreuve, les deux oculaires seront en général déplacés; mais l'un d'eux est ramené à sa position première, de telle sorte que tout l'effet de la dilatation se porte sur le second. Supposons que ce soit celui de droite. Alors l'image correspondante des fils croisés se trouve déplacée latéralement dans l'oculaire, et au moyen d'une vis micrométrique on apprécie son déplacement, et l'on en conclut le déplacement de l'oculaire, c'est-à-dire la dilatation de la règle du milieu.

Cet appareil est ingénieux; mais, à cause de l'inégale température des appendices des règles, qui sont en partie dans le bain et en partie au dehors, il paraît impossible que les axes des objectifs et des oculaires n'éprouvent pas des déviations qui troublent les résultats.

L'appareil suivant (Fig. 11), que j'ai fait construire il y a plusieurs années pour des recherches de ce genre, et aussi pour servir de *comparateur* des mesures linéaires, permet d'arriver à une exactitude beaucoup plus grande.

f' est une plaque de fonte armée de trois pointes mousses en acier, sur lesquelles repose tout l'appareil; cette plaque repose elle-même sur une sorte d'établi en bois très-solide.

f est une règle de fer en forme de T; elle est carrée, de 45 millimètres de côté, et de 12 décimètres de longueur; elle a

trois sillons profonds et angulaires, par lesquels elle repose sur les pointes de la plaque de fonte; ainsi, elle ne peut être ni faussée ni courbée par la dilatation. Cette règle porte la lunette *fixe* h, qui reste immobile dans chaque opération, mais qui peut, suivant le besoin, être transportée en différents points de la longueur de la règle.

adb est une alidade de laiton tournant autour de l'axe ac; elle se compose d'une bande horizontale et d'une forte nervure verticale d qui l'empêche de fléchir et de se déjeter. Cette alidade porte la lunette *mobile* g, qui tourne avec elle, et dont la longueur focale est telle, que la distance du point a au point où elle vise est à peu près le tiers de la longueur ab.

x et x' sont deux galets qui sont liés à l'extrémité b de l'alidade, et qui reposent sur la règle de fer; de cette manière, l'alidade est parfaitement libre dans sa dilatation et dans son mouvement de rotation.

vv' est la division de l'alidade; cette division est tracée sur argent en traits déliés, distants d'un demi-millimètre environ.

y est une lunette micrométrique, portée sur une pièce qui est fixée elle-même contre l'extrémité de la règle de fer.

z est la tête d'une vis micrométrique qui fait mouvoir les fils croisés de la lunette y; elle est divisée en cent parties de chacune deux millimètres, et il faut 330 divisions pour déplacer les fils de $\frac{1}{2}$ millimètre; on voit donc que, sans fractionner ces divisions, l'on peut estimer $\frac{1}{660}$ de millimètre sur l'extrémité b de l'alidade, ce qui correspond à $\frac{1}{1980}$ de millimètre au point de vue de la lunette g, parce que la longueur ab est triple de la distance du point a au point de vue de cette lunette.

r est une vis de rappel qui sert à imprimer à l'alidade les mouvements convenables.

Pour employer cet appareil à la mesure des dilatations au-dessous de 300°, on dispose au-devant des lunettes une chaudière de cuivre (Fig. 11), montée sur son fourneau, et contenant le bain et la règle d'épreuve mn; celle-ci est disposée sur un support de fer qui repose sur les bords de la chaudière, où sa position est réglée par des systèmes de vis k; ses extrémités ou plutôt des repères tracés sur elle près de ses extrémités, se présentent vis-à-vis deux ouvertures latérales, correspondant aux lunettes, et fermées avec des verres parallèles qui sont simplement pressés contre la paroi de la chaudière. Pour chaque obser-

vation, au moyen des vis k du support, on ramène le repère de l'extrémité n de la règle sous le fil de la lunette fixe h, tandis que l'on suit avec la lunette mobile g les mouvements de l'extrémité m, en faisant mouvoir la vis de rappel r de l'alidade.

On détermine ainsi, avec la lunette micrométrique y, le nombre des divisions qui ont été parcourues en passant de la température du départ à celle de l'observation, et ce nombre donne directement la dilatation de la règle soumise à l'expérience; car on a eu soin, par une expérience préalable, en mettant un micromètre divisé en millimètres au-devant de la lunette mobile g, de déterminer à quelle fraction de millimètre correspond l'une des divisions de l'alidade.

Pour observer les dilatations dans les hautes températures, on dispose les règles sur un autre support en fer, dans un fourneau en briques, où l'on fait passer de l'air chaud ou même de la flamme. Ce fourneau porte, vis-à-vis les lunettes, de petites ouvertures que l'on ouvre à l'instant de l'expérience, et, si la température est inférieure au rouge, on éclaire artificiellement les points sur lesquels visent les lunettes.

On conçoit combien il est facile, pendant les expériences, de garantir l'appareil des variations de température qui changeraient la distance de la lunette fixe au centre de rotation de la lunette mobile.

Dulong et Petit ont employé, pour déterminer la dilatation des corps solides, un autre moyen qui repose sur la dilatation absolue du mercure, dont nous parlerons tout à l'heure. Ayant ainsi déterminé la dilatation du verre et du fer, ils se sont servis pour arriver à la dilatation des autres corps, du *pyromètre* imaginé par Borda à l'occasion de la mesure de la méridienne. Ce pyromètre est représenté dans la figure 12 : il se compose de deux règles de métal, posées l'une sur l'autre dans toute leur longueur, et réunies d'une manière invariable à l'une de leurs extrémités seulement. Chaque règle porte à son autre extrémité une tige de laiton qui s'élève d'abord verticalement, et se recourbe ensuite horizontalement. Les branches horizontales de ces deux pièces additionnelles peuvent glisser l'une sur l'autre, quand les deux règles s'allongent inégalement; et, sur la ligne où elles se joignent, chacune d'elles est divisée en parties égales très-petites, mais de manière à former un *nonius* ou un *vernier*, c'est-à-dire que 20 divisions de l'une sont, par exemple, équi-

valentes à 19 divisions de l'autre ; celle-ci portant, je suppose, des cinquièmes de millimètre, on pourra, par la coïncidence des divisions, estimer des vingtièmes de cinquième ou des centièmes de millimètre. Cette coïncidence s'observe à la loupe, comme dans les verniers ordinaires. Les règles de Dulong et Petit avaient 12 décimètres de longueur, 25 millimètres de largeur, et 4 millimètres d'épaisseur. Une différence de température de 1° produisait un déplacement correspondant à peu près à une partie du vernier. Le pyromètre étant porté, par exemple, de la température 0 à la température de 100°, les deux règles s'allongeaient inégalement. La pièce additionnelle de la plus dilatable glissait sur la pièce additionnelle de l'autre ; par exemple, de 100 parties du vernier, qui formaient une longueur absolue de 1 millimètre. Connaissant ainsi la différence des dilatations linéaires des deux règles ; connaissant, d'ailleurs, la dilatation linéaire de l'une d'elles, et sa longueur primitive, il était facile d'en déduire la dilatation linéaire de l'autre.

Les dilatations linéaires des corps solides étant connues, il suffit de les tripler pour avoir la dilatation cubique (**127**).

Les dilatations des vases de différentes formes se déterminent par ce principe, que l'augmentation de capacité d'un vase par la chaleur est égale à l'augmentation que prendrait un corps solide de même substance, et capable de remplir exactement le vase ; ainsi la capacité d'un vase de verre étant, par exemple, de 150 centimètres cubes à 0, sa capacité à 100° sera $150(1+100a)$, a étant la dilatation cubique du verre, qui est de 0,00002584.

Les corps homogènes se dilatent uniformément dans tous les sens ; mais les corps dont la structure n'est pas identique dans toutes les directions se dilatent sans doute très-irrégulièrement dans leurs diverses dimensions ; c'est ce que M. Mitscherlich a constaté depuis longtemps pour certains cristaux. Si l'on prend, par exemple, une plaque épaisse de la variété de chaux sulfatée connue sous le nom de *fer de lance*, dont les deux bouts *ab* et *cd* sont taillés de manière à former des surfaces planes, parallèles entre elles et perpendiculaires à la jonction hémitropique *mm'*, on remarque qu'à la température où le cristal a été travaillé, ces deux surfaces restent bien exactement planes ; mais quand on porte la plaque à 50, 60 ou 80°, l'inégale dilatation fait de chacune une *surface brisée*, la première en *m'*, la seconde en *m* (Fig. 29) ; les deux plans *am'* et *bm'* forment un angle rentrant,

et les deux plans *cm* et *dm* un angle saillant. Car, si l'on regarde par réflexion et très-obliquement un objet délié et très-éloigné sur l'un ou l'autre des bouts de la plaque, on en voit deux images; ce qui prouve bien que le cristal s'est déformé par l'inégale dilatation.

Ce principe peut être généralisé en accolant artificiellement deux cristaux pareils, mais sur des faces diversement inclinées à l'axe, et en les faisant travailller ensuite pour en faire une surface plane qui se déformera plus ou moins par la chaleur.

D'après les expériences qui ont été faites à l'Observatoire de Poulkowa, par MM. Schumacher, Pohrt et Moritz, la glace elle-même se dilate et se contracte avec assez de régularité, son coefficient de dilatation paraît être de 0,000052; cette observation a de l'importance, elle justifie les explications que l'on donnait, soit des soulèvements qui se produisent quelquefois dans les champs de glace, soit les ruptures profondes qui s'opèrent brusquement et avec tant de bruit dans la masse des glaciers.

Le tableau suivant contient les résultats des principales expériences qui ont été faites pour déterminer les coefficients de dilatation des diverses substances.

Table des Coefficients de dilatation linéaire des solides.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	COEFFICIENT de dilatation linéaire entre 0 et 100°.
Suivant Lavoisier et Laplace.	
Flint-glass anglais	0,000 008 116
Platine (selon Borda)	0,000 008 565
Verre de France avec plomb	0,000 008 719
Tube de verre sans plomb	0,000 008 757
Id.	0,000 008 969
Id.	0,000 008 976
Id.	0,000 009 175
Verre de Saint-Gobain	0,000 008 908
Acier non trempé	0,000 010 788
Id.	0,000 010 791
Id.	0,000 010 796
Acier trempé jaune, recuit à 65°	0,000 012 395
Fer doux forgé	0,000 012 204
Fer rond passé à la filière	0,000 012 350
Or de départ	0,000 014 660
Or au titre de Paris, recuit	0,000 015 136
Id. non recuit	0,000 015 515
Cuivre	0,000 017 122
Id.	0,000 017 173
Id.	0,000 017 224

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	COEFFICIENT de dilatation linéaire entre 0 et 100°.
Suivant Lavoisier et Laplace.	
Cuivre jaune ou laiton	0,000 018 667
Id.	0,000 018 782
Id.	0,000 018 897
Argent au titre de Paris	0,000 019 086
Argent de coupelle	0,000 019 097
Étain des Indes ou de mélac	0,000 019 376
Étain de Falmouth	0,000 021 729
Plomb	0,000 028 483
Suivant Smeaton.	
Verre blanc (tubes de baromètre)	0,000 008 333
Régule martial d'antimoine	0,000 010 833
Acier poule	0,000 011 500
Acier trempé	0,000 012 250
Fer	0,000 012 583
Bismuth	0,000 013 916
Cuivre rouge battu	0,000 017 000
Cuivre rouge 8 parties, étain 1	0,000 018 166
Cuivre jaune fondu	0,000 018 750
Cuivre jaune 16 parties, étain 1	0,000 019 083
Fil de laiton	0,000 019 333
Métal de miroir de télescope	0,000 019 333
Soudure, cuivre 2 parties, zinc 1	0,000 020 583
Étain fin	0,000 022 833
Étain en grains	0,000 024 833
Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2	0,000 025 083
Zinc 8 parties, étain 1, un peu forgé	0,000 026 916
Plomb	0,000 028 666
Zinc	0,000 029 416
Zinc allongé au marteau de $\frac{1}{12}$	0,000 031 083
Suivant le major général Roy.	
Fer fondu (prisme de)	0,000 011 100
Acier (verge d')	0,000 011 445
Cuivre jaune de Hambourg	0,000 018 555
Suivant Troughton.	
Platine	0,000 009 918
Acier	0,000 011 899
Fer tiré à la filière	0,000 014 401
Cuivre	0,000 019 188
Argent	0,000 020 826
Suivant Wollaston.	
Palladium	0,001 000 000
Suivant Dulong et Petit.	
Platine	0,000 008 842
Id. coefficient moyen entre 0 et 300°	0,000 009 183
Verre	0,000 008 613
Id. coefficient moyen entre 0 et 200°	0,000 009 225
Id. coefficient moyen entre 0 et 300°	0,000 010 108

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	COEFFICIENT de dilatation linéaire entre 0 et 100°.
Suivant Dulong et Petit.	
Fer	0,000 011 821
Id. coefficient moyen entre 0 et 300°	0,000 014 684
Cuivre	0,000 017 182
Id. coefficient moyen entre 0 et 300°	0,000 018 832
Suivant M. Froment.	
Platine, un mètre type	0,000 007 492

Table des coefficients de dilatation cubique du verre, entre 0 *et* 100°.

Dulong et Petit		0,000 025 820
Despretz		0,000 025 800
Rudberg		0,000 022 860
Magnus		0,000 025 470
Regnault,	depuis	0,000 021 010
	jusqu'à	0,000 026 480
Pierre	depuis	0,000 019 030
	jusqu'à	0,000 026 650

Il importe de remarquer ici que la diversité des résultats obtenus par M. Regnault et par M. Pierre ne tient ni à l'incertitude des procédés ni à la différence des matieres soumises aux expériences; le même verre éprouve réellement des dilatations qui varient entre ces limites suivant les circonstances dans lesquelles il a été travaillé, et ces circonstances sont elles-mêmes trop changeantes pour que l'on puisse les définir avec précision; ainsi, dans les recherches exactes, il faut avoir soin de déterminer le coefficient de dilatation des vases eux-mêmes avec lesquels on opère (voy. *dilatation des liquides*, page 215, *méthode des pesées*, et 217 *méthode des thermomètres comparés*).

Les accroissements que prennent les coefficients moyens de dilatation du platine, du verre, du fer et du cuivre, d'après les expériences de Dulong et Petit, lorsqu'on s'élève aux températures de 200 et 300°, sont rendus plus frappants lorsqu'on détermine les températures que marqueraient des thermomètres

construits avec ces substances. Ces déterminations sont faciles : en effet, construire un tel thermomètre c'est admettre que, au delà de 100°, comme entre 0° 100°, un degré correspond à une dilatation égale au coefficient constant n, par conséquent, qu'à la température de x^0 correspond l'allongement nx ; d'un autre côté, le coefficient moyen étant n' pour la température t' comptée sur le thermomètre ordinaire, l'allongement est $n't'$; la température inconnue x est donc déterminée par la condition

$$nx = n't', \quad \text{d'où} \quad x = t' \cdot \frac{n'}{n}.$$

On trouve ainsi que pour $t' = 300$, les substances dont il s'agit donnent les résultats suivants :

platine, 311°,6 ; verre, 352°,9 ; fer, 372°,9 ; cuivre, 328°,8.

129. Application de la dilatation des solides. — La *puissance de dilatation* d'un corps est égale à la *résistance de compression* dont il est capable. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour réduire la longueur d'une barre de fer verticale autant que la réduirait un abaissement de température de 1°, il est évident qu'en la chargeant à sa partie supérieure du poids de mille kilogrammes, et en la chauffant de 1°, la dilatation due à la chaleur compensera la compression due à la charge, et sa longueur restera la même. C'est d'après ce principe que l'on peut juger des efforts prodigieux qu'exercent les corps en se dilatant ou en se contractant. Les liquides étant peu compressibles et très-dilatables, sont, de tous les corps, ceux qui peuvent produire les plus grands effets de cette nature. Parmi les corps solides, le fer et la fonte ont pareillement une grande puissance de dilatation : c'est pour cela que, dans les grands ouvrages où l'on doit mettre bout à bout des barres de fer sur une longueur de plusieurs centaines de mètres, on les ajuste de distance en distance pour que l'extrémité d'une barre puisse s'engager dans l'extrémité de la barre suivante, sans la presser. Dans les tuyaux de conduite, l'ajustement est un peu plus difficile ; mais on y parvient cependant avec des lames de plomb, dont on enveloppe l'extrémité du tuyau qui doit s'engager dans l'extrémité plus large du tuyau suivant.

La *puissance de contraction* des solides est égale à la *résistance de traction* qu'ils peuvent opposer. S'il faut un poids de

mille kilogrammes pour donner à une barre de fer verticale un allongement égal à celui qu'elle prendrait pour une augmentation de température de 1°, il est évident que, si on la charge à son extrémité inférieure du poids de mille kilogrammes, et qu'en même temps on la refroidisse de 1°, la contraction du refroidissement compensera l'allongement de la traction, et la longueur restera la même que si la barre n'était ni refroidie de 1°, ni tirée par mille kilogrammes. La ténacité du fer étant très-grande, on peut profiter de cette propriété pour exercer des efforts qui surpasseraient peut-être nos moyens mécaniques. On doit tenir compte de cette double propriété, lorsqu'on emploie des matériaux qui sont exposés à de grands changements de température. Il n'est pas douteux, par exemple, qu'une barre de fer ne se courbe lorsqu'elle s'échauffe, si ses deux extrémités rencontrent des obstacles que l'effort de sa dilatation ne puisse pas repousser; et il n'est pas douteux qu'elle ne se rompe par le refroidissement, si ses extrémités sont fixées à des obstacles que l'effort de la contraction ne puisse pas rapprocher. C'est ainsi que, dans l'opération du moulage, beaucoup de pièces cassent par le refroidissement, lorsque leurs formes et leurs proportions n'ont pas été assez bien combinées pour que le *retrait* s'accomplisse librement.

Pendule compensateur. — Nous avons déjà eu occasion de faire remarquer que les horloges et les pendules avancent pendant l'hiver et retardent pendant l'été, par l'effet des contractions et des dilatations qu'éprouve la tige du pendule. Mais l'on est parvenu à corriger ce défaut : les pendules dans lesquels les effets de la dilatation sont ainsi détruits s'appellent *pendules compensateurs*. On en a varié la forme de mille manières. Les figures 22, 23, 24, représentent les trois modes le plus généralement adoptés. Le premier est destiné aux grandes horloges publiques. Le pendule est porté en *a* par une sorte de levier en équerre *abc*, dont l'axe est en *b*; le bras *bc* de ce levier porte un heurtoir d'acier, contre lequel vient butter la forte tige de métal *m*. Quand la température s'élève, le pendule s'allonge, mais la traverse *m* s'allongeant pareillement, pousse le heurtoir, fait tourner le levier et remonte le point *a*. La longueur du pendule se trouve diminuée, car elle compte seulement à partir de la pièce fixe *p* qui pince le ressort flexible de suspension. La distance du heurtoir à l'axe *b* se règle au moyen d'une vis pour déterminer une com-

pensation complète : on comprend, par exemple, que cette distance étant le quart de la longueur *ba*, le point *a* fait quatre fois plus de chemin que le heurtoir, et que la traverse *m* étant de même métal que la tige du pendule et quatre fois plus courte, la compensation aurait lieu.

La figure 23 représente le *pendule à gril*. Les cinq tiges noires sont de fer, tandis que les quatre tiges intermédiaires sont de laiton ; donnons-leur les numéros 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, en allant de gauche à droite ; celles de fer auront les numéros impairs, et celles de laiton les numéros pairs. Ajoutons que les deux traverses *t* et *t'* sont fixées aux tiges 1 et 9, et font corps avec elles, tandis que les traverses *a*, *b* et *c* sont mobiles. Les tiges 2 et 8, fixées sur *t'*, relèvent, par leur dilatation, la traverse *a*, et relèvent en même temps les tiges 3 et 7 qui sont fixées sur elle par leur extrémité supérieure, et en même temps encore la traverse *b*, à laquelle elles s'attachent par leur extrémité inférieure. Mais sur cette traverse *b* reposent les tiges 4 et 6, qui portent en haut la traverse *c*, et le point d'attache de la tige 5, qui passe librement par un trou des traverses *b* et *t'*, pour venir supporter la lentille. Ainsi, tandis que le centre d'oscillation est abaissé de toute la dilatation du fer sur une longueur l égale à la longueur du pendule, il est relevé de l'excès de la dilatation du cuivre sur le fer, pour une longueur l' égale à la somme des longueurs des tiges 2 et 4. Pour que la compensation ait lieu, il suffit donc de prendre les longueurs l et l' telles que l'on ait

$$l'c - l'f = lf, \quad \text{ou} \quad l'\left(\frac{c}{f} - 1\right) = l,$$

en désignant par c la dilatation du cuivre, et par f celle du fer. Or, la valeur de $\frac{c}{f}$ étant à peu près $\frac{5}{3}$, il en résulte à peu près

$$l' = \frac{3l}{2},$$

c'est-à-dire que la somme des demi-longueurs des tiges de cuivre doit être environ une fois et demie la longueur du pendule à tige de fer.

La figure 24 représente un pendule compensé par la dilatation du mercure ; ce liquide est contenu dans un vase cylindrique de verre, et forme lentille : comme son niveau s'élève par la chaleur, le centre d'oscillation est remonté par cette cause. Il suffit

donc de proportionner la hauteur et la masse du cylindre de mercure d'après la longueur et la nature de la tige du pendule.

Lames de compensation. — On appelle ainsi un système de deux lames composées de métaux inégalement dilatables, soit que ces lames aient été soudées ensemble, soit qu'elles aient été clouées l'une contre l'autre par des clous très-rapprochés. Supposons qu'une telle lame soit formée, par exemple, de zinc et de fer, et qu'elle soit droite à la température de 20°, il est évident qu'au-dessus de 20° elle devra se courber, le zinc étant en dehors, parce qu'il s'allonge plus que le fer (Fig. 13), et qu'au-dessous de 20° elle devra se courber, le zinc en dedans, parce qu'il se raccourcit plus que le fer. L'appareil représenté dans la figure 14 met en évidence cette propriété; la lame droite *ab* est composée de deux bandes, l'une de fer et l'autre de zinc; en le plongeant dans l'eau chaude, on voit l'extrémité libre *b* se porter du côté *f* et faire marcher l'aiguille *d*; l'effet est contraire quand on le retire ou quand on le plonge dans un bain plus froid que la température ambiante. On a mis à profit cette propriété pour compenser les balanciers des chronomètres, et pour donner ainsi aux navigateurs des montres d'une précision qui ne laisse rien à désirer. La figure 25 représente un balancier compensé : on voit que l'effet de la dilatation éloigne du centre les extrémités des rayons *a*; mais en même temps, par l'effet des lames de compensation qui se courbent de plus en plus à mesure que la température s'élève, les extrémités *b* des arcs se rapprochent au contraire du centre, et tout l'artifice consiste à combiner l'effet des lames avec les variations d'élasticité du ressort spiral, pour que les oscillations restent parfaitement isochrones malgré les variations de température. C'est pour cela qu'on adapte aux arcs *bimétalliques* du balancier des masses d'or, à vis, *m* qui servent à régler la compensation, et à maintenir le centre de gravité dans l'axe du mouvement.

Thermomètre à cadran (Fig. 15). — La lame de compensation *fgh* est composée de cuivre et d'acier; elle est fixée en *f*, se recourbe en *g* et se termine en *h*. Autour d'un axe, tourne un levier dont le petit bras est sans cesse appuyé contre l'extrémité *h*, et dont le grand bras porte les dents *dd'*. Les mouvements très-petits que la dilatation peut produire à l'extrémité *h* sont déjà amplifiés dans le même rapport que les bras de levier; ensuite, les dents *dd'* engrènent dans un petit pignon qui tourne

autour de l'axe central *c*, et l'aiguille *li*, tournant autour du même axe, amplifie encore les mouvements du pignon. On calcule les dimensions pour que les 100° du thermomètre centigrade correspondent à peu près à une révolution entière de l'aiguille. Les instruments de cette espèce doivent être gradués sur le thermomètre à mercure, de degré en degré, ou au moins de 10 en 10 degrés.

Thermomètre de Régnier.— Il se compose d'une tige de cuivre (Fig. 16) et d'une bande de fer *f*, en arc, dont les extrémités sont fixées sur la tige de cuivre. Par la dilatation, le sommet de l'arc se rapproche de la corde et agit sur une pièce *a* qui met en mouvement l'aiguille *g*.

Thermomètre de Breguet.— Cet instrument est le plus délicat et le plus commode de tous les thermomètres métalliques : il se compose d'un petit ruban de métal, de 1 à 2 millimètres de largeur, qui est roulé en spire, comme le représente la figure 17; la spire est attachée par son sommet à une pièce de cuivre qui la laisse parfaitement libre et isolée, et, à son extrémité inférieure, elle porte une aiguille horizontale, très-légère, dont la pointe parcourt la circonférence du cercle divisé *cc'* ; le cercle est évidé, et repose sur trois pieds très-minces, afin que l'air puisse circuler aisément entre tous les tours de la spire. Une cloche recouvre l'appareil, pour le garantir de l'agitation extérieure.

Le ruban de la spire est composé de trois couches métalliques superposées, argent, or et platine : la couche d'or, qui est au milieu, sert à souder les deux autres. Ce système a d'abord une épaisseur sensible, mais on le lamine jusqu'à le réduire à une épaisseur totale de $\frac{1}{60}$ de millimètre : on peut juger par là de la masse excessivement petite de l'instrument, et par conséquent de la rapidité avec laquelle il prend la température de l'air qui le touche.

Par l'inégale dilatation du platine et de l'argent, la spire se tord ou se détord quand la température s'élève ou s'abaisse, et l'aiguille marche pour obéir à ces mouvements. On gradue cet instrument en comparant sa marche à celle d'un thermomètre à mercure très-sensible.

Pyromètre de M. Brongniart.— Il est destiné à comparer l'intensité des feux de moufle dans la fabrication de la porcelaine. Il se compose (Fig. 28) d'un support de porcelaine dégourdie ou biscuit, portant une rainure à talon, dans laquelle se loge un cylindre d'argent *ab*, à sa suite est un cylindre de même matière

que le support lui-même; l'extrémité de celui-ci vient agir sur une aiguille g mobile sur un cadran c. Le cylindre de biscuit se dilatant à peu près comme le support sur lequel il repose, on obtient pour effet tout l'excès de la dilatation de l'argent sur celle de la longueur correspondante du support; c'est en vertu de cet excès que l'aiguille se meut, et ces mouvements, sans donner des degrés de l'échelle thermométrique ordinaire, servent cependant à régler avec assez d'approximation le feu de la moufle, au dehors de laquelle se trouvent le cadran et à peu près les deux tiers de la longueur de l'appareil.

130. Dilatation des liquides.— On distingue dans les liquides la *dilatation apparente* et la *dilatation absolue :* la dilatation apparente est celle que paraît prendre le liquide dans le vase qui le contient; la dilatation absolue est celle que prendrait le liquide dans un vase qui n'éprouverait lui-même aucune dilatation.

Il est facile de voir que le coefficient de dilatation apparente d'un liquide est toujours égal à la différence des coefficients du liquide et de l'enveloppe. Soient v le volume du liquide à 0, m son coefficient de dilatation et k celui de l'enveloppe; en passant à t° le volume du liquide devient $v(1+mt)$. La capacité de l'enveloppe, qui est aussi v à la température 0, devient pareillement $v(1+kt)$; l'accroissement apparent de volume est par conséquent

$$v(1+mt) - v(1+kt) = vt(m-k).$$

Mais, d'après nos définitions, il faut le diviser par le volume à 0 et par la température, c'est-à-dire, par vt pour avoir le coefficient de dilatation apparente que nous désignerons par a; on a donc en effet

$$a = \frac{vt(m-k)}{vt} = m - k.$$

On voit d'après cela que dans la recherche des lois de la dilatation des liquides, il faut s'appliquer plutôt aux dilatations absolues qu'aux dilatations apparentes.

Dulong et Petit ont déterminé la *dilatation absolue du mercure* au moyen d'un appareil fondé sur ce principe d'hydrostatique, que les hauteurs des colonnes liquides en équilibre sont en raison inverse de leurs densités.

Pour montrer dans les cours publics que l'on peut en effet y parvenir par cette voie, on fait l'expérience suivante (Fig. 31):

deux tubes de verre d'environ un mètre de hauteur, communiquant par leur partie inférieure, contiennent un liquide coloré, de l'eau ou de l'alcool; chacun d'eux est entouré d'un manchon. Dans le manchon de gauche, par exemple, on verse de l'eau à la température 0; dans celui de droite, on verse de l'eau chaude, et à l'instant le niveau s'élève, dans le tube le plus chaud, d'une quantité très-sensible au-dessus du niveau du tube le plus froid. Cette différence est l'effet de la dilatation, et ne dépend évidemment que des températures des colonnes liquides et de leur hauteur.

La figure 30 représente l'appareil de Dulong et Petit, tel qu'il a été disposé pour leurs recherches.

at et *a't'* sont deux tubes verticaux, communiquant par le tube horizontal *tt'*. On les remplit de mercure jusqu'à la hauteur *nn'* : l'action capillaire est nulle à cause de la grandeur des diamètres, et l'égalité de pression s'établit parfaitement quoique le tube *tt'* soit très-étroit. Cet appareil repose sur une règle de fer *ff'*, qui repose elle-même sur une forte table de bois que l'on met de niveau par le moyen de vis calantes *vv'*. Deux montants de fer *m* et *m'*, portant des anneaux à clavettes *c* et *c'*, maintiennent les tubes dans une position bien verticale. Le montant *m* est terminé par un arc de fer, dont l'extrémité *r* doit servir de repère.

L'une des branches est maintenue à la température 0, l'autre est portée successivement à différentes températures; et tout se réduit, dans ces recherches, à mesurer exactement les hauteurs inégales des deux colonnes et la température de la colonne dilatée.

Les hauteurs des colonnes au-dessus de l'axe du tube *tt'* se déterminent par un instrument particulier, représenté (Pl. 9, Fig. 12, 13, 14), et que l'on peut appeler *cathétomètre*, parce qu'il sert à mesurer toutes les hauteurs linéaires verticales; il nous servira surtout pour la dilatation des gaz. Le cathétomètre se compose d'un pied à trois vis calantes portant un axe vertical très-solide; sur cet axe est ajusté un manchon *a* qui tourne librement et sans jeu; une règle divisée *bb'* se trouve liée au manchon pour tourner avec lui. Cette règle est rendue inflexible au moyen de la nervure *c*, et une lunette horizontale *d*, portant son niveau *e*, ses vis de réglage et ses vis de pression, peut se mouvoir de haut en bas et de bas en haut sur toute sa longueur *bb'*; le support de la lunette est muni d'un vernier qui parcourt les divisions de la règle, et qui permet d'estimer aisément les 20es ou même les 30es de millimètre. Pour régler l'instrument, la lunette

se met d'abord horizontale au moyen de son niveau, et l'on tourne ensuite les vis calantes du pied jusqu'à ce que le niveau reste parfaitement immobile pendant qu'on fait faire à la règle une révolution entière autour de l'axe de rotation.

Pour les expériences dont il s'agit, le cathétomètre se dispose, à une certaine distance, de manière que les axes des tubes at et $a't'$ et le repère r se trouvent successivement au point de vue lorsqu'on fait tourner la lunette autour de l'axe de l'instrument, après l'avoir mise à la hauteur convenable. Alors on détermine une fois pour toutes, la hauteur h du repère r au-dessus de l'axe du tube horizontal tt' ; cela fait, on se contente à chaque observation de pointer au repère et de voir ensuite de combien il faut faire descendre ou monter la lunette pour viser au sommet des deux colonnes : s'il a fallu, par exemple, descendre de z pour l'une et de z' pour l'autre, les hauteurs de ces colonnes seront $h - z$ pour la première et $h - z'$ pour la seconde.

Les températures se déterminent de la manière suivante : un cylindre g enveloppe le tube at ; on le remplit de glace pilée, et, au moyen de la petite fenêtre o on peut pointer la lunette au sommet de la colonne. La température du montant m restant la même, le repère r reste parfaitement fixe. Un cylindre g' enveloppe pareillement le tube $a't'$; on le remplit d'une huile fixe qui supporte plus de 300° sans bouillir. Un fourneau élevé autour de g' sert à l'échauffer à divers degrés. Deux thermomètres i et i' servent à marquer la température du bain d'huile et par conséquent celle du mercure. Le premier, i, est un thermomètre à air que nous décrirons plus loin ; le second, i', est un thermomètre à mercure (Pl. 8, Fig. 19) que l'on peut appeler thermomètre à poids (voy. p. 216) : par la dilatation, le mercure s'échappe dans la petite capsule s : on le recueille, on le pèse, on compare son poids à celui du mercure qui est contenu dans le tube à la température 0, et l'on en déduit la température, comptée sur le thermomètre à mercure. Les températures et les hauteurs des colonnes s'observent rapidement, lorsqu'on a fermé toutes les issues du fourneau et pendant l'état *maximum* qui dure plusieurs instants.

Nous avons vu (**127**) que le coefficient de dilatation cubique est donné par la formule :

$$m = \frac{v' - v}{vt}.$$

Ici nous connaissons t, et nous n'avons besoin de connaître ni v ni v', car les volumes sont en raison inverse des densités, et, dans notre appareil, les densités sont en raison inverse des hauteurs des colonnes; donc les volumes sont comme les hauteurs des colonnes; et $h-z$ désignant la hauteur de la colonne du tube at, qui est à la température 0, $h-z'$ désignant la hauteur de la colonne du tube $a't'$, pour la température t nous aurons

$$\frac{v'}{v}=\frac{h-z'}{h-z}; \quad \text{d'où} \quad \frac{v'-v}{v}=\frac{z-z'}{h-z},$$

et par conséquent $$m=\frac{z-z'}{t(h-z)}.$$

Par ce moyen Dulong et Petit sont parvenus à déterminer la dilatation absolue du mercure jusqu'à 300°, et ils ont trouvé les résultats suivants :

Températures du thermomètre à air.	Coefficients moyens pour 1°.	Températures indiquées par la dilatation du mercure supposée uniforme.
0°		0°
100....	$\frac{1}{5550}$ = 0,00018018......	100
200....	$\frac{1}{5425}$ = 0,00018433......	204,61
300....	$\frac{1}{5300}$ = 0,00018868......	314,15

Les doutes que l'on pouvait avoir sur ces résultats à cause du changement que les expériences de Rudberg ont amené dans le coefficient de dilatation de l'air, viennent d'être dissipés par les nouvelles recherches de M. Regnault. Cet habile physicien, en reprenant ces expériences par un procédé analogue mais fort perfectionné, trouve définitivement des nombres peu différents, comme on le voit par le tableau suivant :

Températures du thermomètre à air	Coefficients moyens pour 1°.	Températures indiquées par la dilatation du mercure supposée uniforme.
0°..........	»	0°
50	0,00018024........	49,67
100	18143........	100,00
150	18262........	150,98
200	18382........	202,63
250	18500........	254,93
300	18620........	307,88
350	18740........	361,52

Voici comment on détermine la dilatation des solides au moyen de celle du mercure.

Dilatation du verre. Méthode des pesées. — A un réservoir de verre on soude un tube court et très-étroit, on le remplit de mercure et on le pèse à 0; soit p le poids du mercure; on le chauffe dans un bain jusqu'à une température connue t; une partie du mercure sort, on le recueille et on le pèse; soit p' son poids; avec ces deux données et le coefficient de dilatation du mercure, on peut déterminer le coefficient m' de dilatation cubique du verre. En effet, soit v la capacité du vase à 0, elle sera $v(1+m't)$ à t; v est aussi le volume du mercure à 0 et $v(1+mt)$ son volume à t, c'est ce volume qui correspond au poids total p; mais à la même température t le volume $v(1+m't)$ qui remplit le vase correspond au poids $p-p'$; on a donc

$$\frac{p}{v(1+mt)}=\frac{p-p'}{v(1+m't)},\quad \text{d'où}\quad m'=\frac{m(p-p')}{p}-\frac{p'}{tp}.$$

Dilatation du fer. — Dulong et Petit ont employé cette méthode pour déterminer le coefficient de dilatation des métaux qui ne sont pas attaquables par le mercure. Prenons pour exemple le fer. Avant de souder le tube étroit du réservoir, qui est ici un tube long et large, on y introduit une baguette de fer; soient p'' et d'' son poids et sa densité qui sont connus, soit m'' son coefficient de dilatation qu'il s'agit de déterminer. On remplit l'appareil de mercure, et l'on trouve qu'à 0 il en contient un poids p, sa densité étant d, et son coefficient de dilatation m; on chauffe à une température t, soit p' le poids du mercure qui sort; le volume du mercure qui reste à t^{o} est $(p-p')\left(\frac{1+mt}{d}\right)$; le volume du fer $p''\left(\frac{1+m''t}{d''}\right)$, celui du réservoir $\frac{p}{d}(1+m't)$, et l'on a

$$(p-p')\left(\frac{1+mt}{d}\right)+p''\left(\frac{1+m''t}{d''}\right)=\frac{p}{d}(1+m't),$$

d'où l'on peut tirer m''.

Thermomètre à poids ou à déversement. — Dulong et Petit ont employé dans leurs recherches un thermomètre qui a de grands avantages sur le thermomètre ordinaire, surtout lorsqu'il

s'agit d'observer des températures élevées. Il est représenté dans la figure 19. C'est l'appareil que nous avons indiqué tout à l'heure pour déterminer la dilatation absolue du verre. Soient p le poids du mercure qu'il contient à 0; p', le poids du mercure qui sort en passant de la glace fondante à l'eau bouillante; si l'appareil était muni d'une tige cylindrique, ce poids p' est le poids du mercure qui s'y logerait, et en la supposant elle-même à l'eau bouillante, il en remplirait juste toutes les divisions depuis 0 jusqu'à 100°. Mais alors, le réservoir ne contenant plus qu'un poids de mercure $p-p'$, il est évident qu'à cette température la capacité de la tige entre 0° et 100° est à celle du réservoir au-dessous du zéro, comme p' est à $p-p'$. Or, si la tige et le réservoir sont composés d'une même matière également dilatable, ce rapport restera le même à toute température; donc la capacité correspondante à 1° est toujours la centième partie de $\frac{p'}{p-p'}$. Dulong et Petit ont trouvé $\frac{p'}{p-p'}=\frac{1}{64,80}$ pour le verre dont ils faisaient usage; ainsi la capacité de 1° était $\frac{1}{6480}$ de la capacité du réservoir, comptée seulement jusqu'au zéro de l'échelle. Il en résulte que dans les thermomètres à mercure et à tige, composés avec cette espèce de verre, la valeur de 1° est toujours $\frac{1}{6480}$ du réservoir. On peut donc supprimer la tige, recueillir le poids p'' de mercure qui sort lorsqu'on porte l'appareil de 0 à une température quelconque t; cette température contiendra autant de degrés qu'il y a de fois $\frac{1}{6480}$ dans $\frac{p''}{p-p''}$; par conséquent

$$t=\frac{6480p''}{p-p''}.$$

Les températures tirées de cette formule sont exactement celles qui seraient indiquées par un thermomètre à tige parfaitement gradué; ainsi le nombre $\frac{1}{6480}$ est le coefficient de *dilatation apparente* du mercure dans le verre.

Le thermomètre à déversement offre même plus de certitude, parce que le réservoir et la tige, quoique composés du même verre, peuvent bien ne pas avoir tout à fait la même dilatation, ce qui est une cause d'erreur pour les thermomètres à tiges, puisque les degrés ne sont plus alors conformes à la définition.

Mais il ne faut pas oublier que la dilatation n'est pas la même pour tous les verres; ainsi $\frac{p'}{100(p-p')}$ ne sera pas toujours égal

à $\frac{1}{6480}$, c'est pourquoi la formule générale de la température devient

$$t = 100.\frac{p''}{p'}.\frac{p-p'}{p-p''}.$$

p est le poids du mercure à 0, p' celui du mercure qui sort en passant de 0 à 100°, p'' celui du mercure qui sort en passant de 0 à t.

Toute la graduation du thermomètre à poids se réduit donc à observer une fois pour toutes p et p' ; et si l'on ne voulait pas remettre à chaque expérience l'appareil au zéro pour obtenir p'', on pourrait y suppléer en pesant l'appareil après l'expérience, pour connaître ce qui manque à son poids.

C'est au moyen de cet appareil, disposé verticalement dans un bain de mercure bouillant, que Dulong et Petit ont déterminé la température de l'ébullition du mercure en degrés du thermomètre ordinaire, et qu'ils l'ont estimée à 360°.

Le coefficient de dilatation du verre étant connu, on peut obtenir le coefficient de dilatation d'un liquide quelconque, en construisant avec ce liquide une sorte de thermomètre à poids; alors, en représentant par m'' son coefficient de dilatation, et par m' celui du verre, on trouve m'' au moyen de la formule de la page 216 qui devient alors

$$\frac{p}{v(1+m''t)} = \frac{p-p'}{v(1+m't)};$$

p est le poids du liquide contenu dans l'appareil à la température 0, p' le poids du liquide qui s'échappe en passant de 0 à t^0.

151. Dilatation des liquides, méthode des thermomètres comparés. — On peut aussi déterminer la dilatation des liquides par une autre méthode que nous appellerons *méthode des thermomètres comparés;* c'est celle qui avait été autrefois employée par Deluc et qui doit toute son importance aux perfectionnements que M. Biot y a introduits en montrant comment les résultats qu'elle donne peuvent être enchaînés par le calcul.

Cette méthode consiste à construire des thermomètres avec les liquides dont on veut connaître la dilatation et à comparer leur marche à celle du thermomètre à mercure.

Mais le verre éprouvant des dilatations inégales, même quand il provient du même creuset, il faut déterminer d'avance le

coefficient de dilatation propre à chacune des enveloppes thermométriques que l'on destine à cet usage. On y parvient de la manière suivante : la tige ayant été calibrée (p. 193) et divisée au diamant en un grand nombre de parties d'égale capacité, on la remplit plusieurs fois, par une colonne de mercure, en notant le nombre des divisions correspondant à chaque colonne, on recueille soigneusement les petites masses de mercure pour les peser ensemble; alors en divisant leur poids par le nombre total des divisions l'on obtient le poids ϖ de mercure qui correspond à une division, pour la température fixe de 15° par exemple, à laquelle on a fait cette espèce de jaugeage. Ensuite on pèse l'enveloppe entière, on la pèse de nouveau après l'avoir remplie du mercure qui doit en faire un thermomètre et l'on connaît ainsi le poids p de mercure qu'elle contient. Désignons maintenant par x le nombre inconnu des divisions égales de la tige qui forme la capacité du réservoir, jusqu'à l'origine elle-même de laquelle ces divisions sont comptées; pour déterminer x il suffit de porter le thermomètre à la température très-exacte de 15°, qui a été celle du jaugeage et d'observer sur la tige, à partir de l'origine, le nombre n de divisions auquel il s'arrête; puisque chacune de ces divisions correspond au poids ϖ, on aura évidemment

$$(x+n)\varpi = p, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{p}{\varpi} - n.$$

La capacité relative du réservoir étant ainsi connue par la valeur de x, rien n'est plus facile que de déterminer le coefficient de dilatation de l'enveloppe. En effet, le thermomètre étant mis dans la glace fondante, on lit sur la tige le point où il s'arrête et l'on en déduit le nombre v des divisions occupées par le mercure, tant dans le réservoir que dans la tige elle-même; on le porte ensuite, avec un bon thermomètre, à une température t, on observe le point où il s'arrête et l'on en déduit pareillement le nombre v' des divisions occupées par le mercure; ces deux observations donnent l'équation

$$v(1+mt) = v'(1+kt); \quad \text{d'où} \quad k = \frac{vm}{v'} - \frac{(v'-v)}{v't},$$

m étant le coefficient de dilatation du mercure ou $\frac{1}{5550}$, k le coefficient de dilatation inconnu du verre.

Plusieurs déterminations pareilles, faites à différents points de l'échelle, doivent donner pour k des nombres très-rapprochés dont on prend la moyenne.

Pour employer maintenant à la recherche des dilatations cette enveloppe de coefficient connu, on en fait sortir le mercure et on la remplit du liquide qu'il s'agit d'observer, en réglant la course de ce nouveau thermomètre d'après les points de l'échelle qu'il doit parcourir. Il est inutile d'y marquer deux points fixes, seulement il faut déterminer avec soin le nombre des divisions que le liquide occupe à la température de la glace fondante; cela fait, il ne reste plus qu'à le disposer dans un bain convenable, à côté d'un bon thermomètre à mercure, impressionnable à peu près comme lui, afin qu'ils puissent prendre ensemble leur température d'équilibre dont on fait l'observation simultanée. Sur le thermomètre à mercure on lit la température t, sur le thermomètre à liquide on lit la division n', comptée à partir du fond du réservoir; or, à la glace fondante, le liquide occupant, par exemple, n divisions, si l'on représente par z l'accroissement absolu de volume correspondant à une division, pour l'intervalle t de température, on a évidemment

$$n(1+z)=n'(1+kt),\quad \text{d'où}\quad z=\frac{n'-n}{n}+\frac{n'kt}{n}.$$

Quand par cette formule on a ainsi calculé diverses valeurs de z correspondant à des températures de plus en plus élevées, on remarque que ces valeurs ne sont pas proportionnelles aux températures t, mais qn'elles vont en croissant à mesure que t devient plus grand, ou, en d'autres termes, que le *coefficient moyen* $\frac{z}{t}$ au lieu d'être constant, comme pour les corps solides et pour le mercure, prend ici des valeurs croissantes avec la température. On a donc essayé d'exprimer z par une fonction de la forme

$$z=at+bt^2+ct^3,$$

a, b, c, étant des constantes. Si l'on choisit en effet trois valeurs de t convenablement espacées, et qu'on les substitue dans cette formule, ainsi que les trois valeurs de z correspondantes, on obtient trois équations qui servent à déterminer les trois constantes a, b, c; et ces valeurs une fois connues il arrive, en général, que pour toutes les autres valeurs de t, cette équation

donne pour z des nombres qui ne diffèrent pas sensiblement de ceux qui se tirent de l'équation fondamentale des dilatations.

En suivant cette méthode M. Pierre a entrepris le travail le plus complet et le plus remarquable qui ait été tenté sur ce sujet; en habile chimiste il s'est appliqué à préparer plus de quarante liquides très-purs, et en habile physicien il les a soumis aux épreuves les plus précises pour en déterminer la dilatation, le poids spécifique et le point d'ébullition. La page suivante contient le tableau des résultats qu'il a obtenus pour la dilatation.

La première colonne contient le coefficient de dilatation à la température zéro; sa valeur ne résulte pas d'une observation directe, mais elle est tirée de la formule

$$z = at + bt^2 + ct^3,$$

après que les coefficients en ont été déterminés par diverses séries d'expériences; c'est évidemment la valeur de a, puisque l'on a en général

$$\frac{z}{t} = a + bt + ct^2,$$

c'est-à-dire que $\frac{z}{t}$ approche d'autant plus d'être égal à a que t est plus près d'être égal à zéro.

On voit dans cette colonne que les liquides les plus dilatables sont l'aldéhyde, et ensuite les éthers chlorhydriques, sulfurique, bromhydrique, formique, etc.

La seconde colonne contient le coefficient moyen de dilatation pour l'intervalle compris entre 0 et le point d'ébullition du liquide; ce coefficient résulte aussi de l'équation précédente, c'est la valeur que prend le second membre quand on y substitue, pour t, le nombre donné par les expériences relatives au point d'ébullition; nombre qui se trouve ici dans la troisième colonne.

L'excès du coefficient de la seconde colonne sur celui de la première met partout en évidence l'accroissement de la dilatation à mesure que la température s'élève. C'est la seule loi qu'il soit possible de tirer de l'ensemble de ces recherches.

M. Pierre a essayé, à la vérité, de déterminer le coefficient vrai de dilatation de chacune de ces substances pour son point d'ébullition et d'examiner l'excès de ce coefficient sur le coefficient à 0 : mais cette longue discussion ne me semble aucunement rationnelle, M. Pierre adopte pour coefficient vrai de dilatation le coefficient différentiel de z par rapport à t, au lieu

Table des coefficients de dilatation de divers liquides, d'après les expériences de M. Pierre.

(Voy. les mêmes substances aux articles Densités et Points d'ébullition.)

NOMS des SUBSTANCES.	COEFFICIENTS DE DILATATION à la température zéro.	COEFFICIENTS DE DILATATION au point d'ébullition.	POINTS d'ébullition.
1. Acétate d'oxyde d'éthyle	0,001 258 496	0,001 489 001	74,1
2. » » de méthyle	0,001 295 954	0,001 484 159	59,5
3. Acide butyrique monohydraté	0,001 025 720	0,001 252 417	163,0
4. Acide sulfureux anhydre	0,001 496 377	0,001 737 142	8,0
5. Alcool éthylique	0,001 048 630	0,001 195 509	78,3
6. » méthylique	0,001 185 570	0,001 329 747	63,0
7. » amylique	0,000 890 011	0,001 068 560	131,8
8. Aldéhyde	0,001 653 523	0,001 827 064	22,0
9. Brome	0,001 038 186	0,001 167 673	63,0
10. Bromure d'éthyle	0,001 337 628	0,001 448 731	40,7
11. » de méthyle	0,001 415 206	0,001 493 693	13,0
12. » d'amyle	0,001 023 212	0,001 279 417	118,7
13. » de silicium	0,000 952 572	0,001 053 126	153,3
14. » de phosphore	0,000 847 205	0,001 996 237	175,8
15. Butyrate d'oxyde d'éthyle	0,001 202 792	0,001 439 571	119,0
16. » » de méthyle	0,001 239 896	0,001 440 012	102,1
17. Chloroforme	0,001 107 146	0,001 320 490	63,5
18. Chlorure d'éthyle	0,001 574 578	0,001 607 429	11,0
19. » » monochloré	0,001 290 718	0,001 371 920	64,8
20. » » bichloré	0,001 174 820	0,001 412 636	74,9
21. Chlorure d'amyle	0,001 171 550	0,001 362 650	101,8
22. » de carbone	0,001 002 628	0,001 187 434	123,9
23. » (bi) de carbone	0,001 183 844	0,001 336 461	78,1
24. » (tri) de phosphore	0,001 128 619	0,001 307 358	78,3
25. » (tri) d'arsenic	0,000 979 073	0,001 140 338	138,8
26. » de silicium	0,001 294 119	0,001 563 537	59,0
27. » (bi) d'étain	0,001 132 801	0,001 338 953	115,4
28. » (bi) de titane	0,000 942 569	0,001 142 034	136,0
29. Éther sulfureux	0,000 990 479	0,001 205 933	160,3
30. » sulfurique	0,001 513 245	0,001 647 354	35,5
31. Formiate d'oxyde d'éthyle	0,001 325 205	0,001 495 056	52,9
32. Iodure d'éthyle	0,001 142 251	0,001 263 687	70,0
33. » de méthyle	0,001 199 591	0,001 327 135	43,8
34. Liqueur des Hollandais	0,001 118 932	0,001 282 410	84,9
35. » » monochlorée	0,001 056 414	0,001 233 895	114,2
36. » » bichlorée	0,000 835 620	0,001 156 047	138,6
37. » » trichlorée	0,000 899 044	0,001 127 900	153,8
38. Sulfure de carbone	0,001 139 804	0,001 249 336	47,9
39. » (bi) de méthyle	0,001 017 049	0,001 440 298	112,1
40. Térébène	0,000 896 554	0,001 123 820	161,0

de prendre cette valeur divisée par $1 + at + bt^2 + ct^3$; oubliant qu'il ne faut plus alors diviser par le volume à 0 qui est pris pour unité, mais bien par le volume vrai du liquide à la température t. Les tables définitives des mémoires de M. Pierre, dans lesquelles il donne en centièmes l'accroissement des coefficients vrais de dilatation, me semblent donc reposer sur une base ar-

bitraire et non pas sur le véritable élément de la question (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. V, XV, XIX, XX, XXI, XXXI, XXXIII).

132. Dilatation des gaz. — Les appareils qui avaient été employés pour déterminer la dilatation des gaz ne pouvaient pas supporter un grand degré de chaleur, j'ai donc essayé, en 1827, de construire un nouvel appareil qui pût servir à la fois depuis les plus basses jusqu'aux plus hautes températures, sans que l'air qu'il contient éprouvât d'autres pressions que la pression atmosphérique; cet appareil, qui m'a servi à déterminer en degrés centigrades toutes les températures jusqu'à la fusion de l'or, peut être appelé *pyromètre à air*.

Je vais indiquer d'abord les principes sur lesquels il repose.

1° *Disposition de l'appareil* (Fig. 7, Pl. 9). *a* est un réservoir contenant le gaz qui s'échauffe; *bc* est un tube de communication n'ayant qu'un petit diamètre intérieur; *t* est un tube de cristal divisé en capacités égales; *s* est un second tube de cristal ouvert en haut et de même diamètre intérieur que *t*, pour que la capillarité ne donne pas de différence de niveau : ces deux tubes réunis en bas par une armature de fer, communiquent toujours entre eux; *z* est un robinet par lequel on peut faire écouler une partie du mercure qu'ils contiennent.

On suppose qu'il y a du gaz sec dans le réservoir, dans le tube de communication et dans la partie supérieure du tube divisé, et que, à la température de la glace fondante, le mercure est exactement au même niveau dans les deux branches, de telle sorte que le gaz supporte la pression atmosphérique du moment.

Alors en élevant la température du gaz contenu dans le réservoir, une portion de ce gaz dilaté passe dans le tube divisé : il y augmenterait la pression; mais, à mesure qu'il arrive, on fait sortir du mercure par le robinet *z*, de manière à maintenir sans cesse le mercure au même niveau dans les deux tubes *t* et *s*, et par là le gaz qui se dilate est maintenu sans cesse sous la pression atmosphérique.

2° *Formules de calcul. c* est la capacité à 0 du réservoir dans lequel l'air s'échauffe; *z* est la capacité du tube de communication; *b* est le nombre des divisions que le gaz occupe dans le tube divisé à partir du zéro de la division qui se trouve en haut; *p* est la hauteur du baromètre au moment de l'observation.

Le volume du gaz contenu dans l'appareil à la température 0 et sous cette pression p, est $c+z+b$; s'il était sous la pression normale de 760 millimètres, il aurait un volume v donné par la relation

$$v=\frac{p}{760}(c+z+b).$$

Cette valeur de v étant une fois connue, elle sert à trouver le nombre b' des divisions que l'on aurait observées à une autre pression p'; car on aurait eu alors

$$v'=c+z+b' \quad \text{et} \quad v.760=v'p',$$

par conséquent

$$b'=\frac{760 \,.\, v}{p'}-(c+z).$$

Désignons maintenant par a le coefficient de dilatation du gaz, et supposons que la portion du réservoir dont la capacité est c soit élevée à la température t, tout le reste de l'appareil conservant la température zéro. Au moment de l'observation, quand le niveau est bien établi, on note en même temps la hauteur p' du baromètre et le nombre d' des divisions que le gaz occupe dans le tube divisé. Ce nombre d' n'appartient pas tout entier au gaz dilaté qui est venu dans le tube et qui s'y est refroidi, car sous cette pression p', le réservoir étant à 0, le tube divisé aurait contenu déjà un nombre de divisions b' donné par la formule précédente, en y mettant pour p' sa valeur. Ainsi le vrai nombre d des divisions occupées par le gaz dilaté est

$$d=d'-b'.$$

Avec cette valeur de d il est facile de trouver le coefficient de dilatation, quand on connaît la température, et réciproquement de déterminer la température quand le coefficient de dilatation est connu. En effet, si le volume c du gaz qui se chauffe se fût chauffé librement, sous la pression p' du moment de l'observation, il serait devenu $c(1+at)$; par conséquent le volume du réservoir qui est devenu $c(1+mt)$, m étant le coefficient de dilatation de sa substance, plus le volume de gaz d, porté lui-même à la température t, ou $d(1+at)$, doivent reproduire le volume $c(1+at)$. On a donc

$$c(1+at)=c(1+mt)+d(1+at);$$

d'où l'on tire

$$a=\frac{cmt+d}{t(c-d)},$$

formule qui donne le coefficient de dilatation au moyen des quantités c, d, m, t, qui sont connues.

On en tire ausssi

$$t=\frac{d}{c(a-m)-ad},$$

formule qui donne la température t, lorsque les deux coefficients a et m sont connus, ainsi que la capacité c du réservoir, et le nombre d des divisions du gaz survenu par l'effet de la dilatation; nombre qui se déduit de l'équation $d=d'-b'$, d' étant observé directement et b' calculé par la formule

$$b'=\frac{760}{p'}.v-(c+z),$$

dans laquelle on connaît v, c, z, et la pression p' de l'instant de l'observation.

Après avoir ainsi réduit l'appareil à sa plus grande simplicité, pour en mieux faire comprendre la disposition, et après avoir expliqué la manière de faire les observations et d'en calculer les résultats, il est nécessaire maintenant de donner des détails sur la méthode qui a été suivie pour déterminer les constantes et pour faire les expériences.

133. L'appareil que je viens de décrire n'est en quelque sorte qu'un appareil de démonstration ; voici maintenant l'appareil pratique tel que je l'ai employé, soit pour déterminer le coefficient de dilatation de l'air, soit pour mesurer les hautes températures.

Coefficient de dilatation de l'air. — Le réservoir est de verre; il est représenté dans la figure 4 ; le tube de communication est très-étroit, pour éviter une correction que l'on ne pourrait pas faire avec exactitude, car en chauffant le réservoir on chauffe aussi une partie du tube; et comme ici la température est inégale, sur la portion qui doit sortir du bain, il faut pouvoir négliger son influence.

On jauge ce réservoir en le pesant plein d'air et ensuite plein d'eau ou de mercure, jusqu'à un trait b, où sa température doit commencer à décroître, parce que le reste de la tige sort du

bain; en faisant les corrections relatives à la température (voy. le chapitre suivant), on obtient la capacité du réservoir à 0 pour toute la portion où l'air prend une température uniforme.

Cela fait, on soude le réservoir au tube divisé lui-même, et par une seconde opération analogue à la première on détermine la capacité *z* comprise entre le point *b* et l'origine des divisions du tube. Il est nécessaire de tenir compte de la forme du ménisque, car le bout du tube divisé qui doit être en bas dans les expériences, est ici en haut, ce qui ferait une petite différence dans le volume de l'air.

On met ensuite le tube divisé en place sur l'appareil représenté (Fig. 9); c'est-à-dire qu'il s'adapte sur une pièce de fer *f* destinée à recevoir trois tubes pareils, savoir : le tube *s* avec lequel *t* doit toujours communiquer pour recevoir la pression atmosphérique, et le tube *r*, qui est le *tube de remplissage* : celui-ci ne communique avec les deux premiers que pour y faire rentrer du mercure pendant le refroidissement. A cet effet, la pièce de fer porte en *z* un robinet à *deux eaux*, comme on le voit un peu au-dessous, n° 1 et n° 2; un peu au-dessous encore est la clef *z'* qui sert à tourner le robinet. Quand on lui donne la position n° 1, le tube de remplissage communique avec *t* et *s*; quand on lui donne la position n° 2, cette communication cesse, et les tubes *t* et *s* communiquent à l'extérieur par le tube recourbé *w*; ce tube est nécessaire pour que l'air extérieur ne puisse pas rentrer. Quand on donne au robinet *z* une position intermédiaire, les tubes *t* et *s* ne communiquent plus ni avec le tube de remplissage ni avec l'extérieur.

Sur la pièce de fer *f* on peut adapter un manchon de verre *l*, *l*, qui enveloppe les trois tubes, et que l'on remplit d'eau pour les maintenir à une température uniforme; mais j'ai reconnu que l'usage de ce manchon était rarement nécessaire; les tubes se maintiennent très-bien à la température ambiante lorsqu'on a soin d'empêcher qu'elle ne change brusquement.

L'appareil ainsi monté est représenté dans la figure 10. Le tube *r* porte un entonnoir pour y verser du mercure, le tube *t* porte le réservoir, le tube *s* porte en haut un petit tube recourbé par lequel on fait une légère aspiration, au moment des expériences, afin de faire osciller la colonne de mercure dans les tubes *t* et *s*, pour qu'elle prenne exactement son niveau dans ces deux tubes.

Il s'agit maintenant de remplir l'appareil d'air ou de gaz bien desséché. Pour cela on ménage à l'extrémité du réservoir un petit tube très-effilé, qui sert déjà à le remplir pour le jaugeage, et qui sert encore à y introduire la quantité de gaz nécessaire. D'abord la pointe de ce petit tube est fermée à la lampe, et l'on fait le vide dans tout l'appareil au moyen de la disposition qui est représentée dans les figures 11, 10. Le tube de plomb y s'adapte avec une bande de caoutchouc sur le tube s, après qu'on en a ôté le petit tube recourbé; par son autre extrémité il communique avec un tube u de chlorure de calcium, ou, ce qui vaut mieux, avec des tubes de ponce imbibée d'acide sulfurique, lesquels communiquent à leur tour, d'une part, avec la machine pneumatique, et de l'autre avec l'air ou avec une cloche contenant le gaz sur lequel on veut expérimenter. Par là on fait le vide et l'on remplit de gaz sec un grand nombre de fois. Cela posé, on ôte le tube y, et l'on verse du mercure bien desséché par le tube s; on brise la pointe du tube effilé qui termine le réservoir, l'excédant d'air sec se dégage, et l'on amène ainsi le niveau à la hauteur que l'on désire dans le tube t, puis l'on scelle de nouveau l'extrémité de la pointe; cette opération ne change pas le jaugeage d'une quantité appréciable. L'appareil ainsi monté, on l'abandonne à lui-même à la température zéro, soit en faisant cette température artificiellement pour le réservoir et pour les tubes, soit en la faisant pour le réservoir seulement, pourvu que la température ambiante n'en soit éloignée que de quelques degrés; dans ce dernier cas il y a une petite correction à faire, qui se calcule sans inconvénient en adoptant l'ancien coefficient 0,00375; en même temps on fait plusieurs observations pour déterminer le volume normal v par l'équation précédente

$$v = \frac{p}{760}(c + z + b).$$

Les observations consistent à déterminer b et p; l'on prend la moyenne des résultats obtenus pour v, qui se trouve ainsi déterminé une fois pour toutes. p est la hauteur barométrique de l'instant de l'observation : elle doit être réduite à 0; b se détermine au moyen du cathétomètre que nous avons déjà décrit (130), et qui se trouve ici placé à côté de l'appareil (Fig. 12), sur un pied solide, dans une position fixe, et choisie avec soin,

pour que l'on puisse, par le seul mouvement de la lunette, obtenir des nivellements exacts pour chacune des divisions du tube divisé t et de son correspondant s. Maintenant toutes les opérations préliminaires sont achevées, il ne reste plus qu'à porter le réservoir à la température de 100°. Pour cela on le maintient dans un bain de vapeur d'eau bouillante (Fig. 5), en choisissant le moment où la hauteur du baromètre est très-voisine de 760, car j'ai cru m'apercevoir qu'il y a quelque chose d'incertain dans la correction lorsqu'elle doit être un peu considérable. On fait ainsi plusieurs expériences, soit comme tout à l'heure en mettant les tubes à zéro, soit en choisissant le moment où la température ambiante en est voisine, sauf à faire la petite correction. Chaque expérience consiste à observer le nombre des divisions d' occupées par le gaz dans le tube divisé, lorsque le mercure sera de niveau dans ce tube et dans le tube s, puis en même temps la pression barométrique correspondante p' que l'on réduit à zéro.

Alors, au moyen de la relation

$$b' = \frac{760}{p'} v - (c + z),$$

on calcule b', puisque v, c, z sont déterminés d'avance, c et z par le jaugeage, v par les observations préliminaires.

Au moyen de la relation

$$d = d' - b',$$

on détermine d; quant au coefficient de dilatation du verre, j'ai adopté dans mes expériences celui de Dulong et Petit, $m = 0{,}0000258$. Ces données étant substituées dans la formule

$$a = \frac{cmt + d}{t(c - d)},$$

on obtient enfin le coefficient de dilatation du gaz.

Diverses séries très-concordantes m'avaient donné pour l'air $a = 0{,}00368$. J'avais même fait part de ce résultat à M. Regnault, quand je sus qu'il s'occupait de recherches sur ce sujet; mais lorsque, quelques mois après, il eut communiqué son travail à l'Académie, mes expériences n'ayant plus d'utilité réelle, je ne leur donnai aucune suite.

M. Regnault ayant étendu et varié ses recherches beaucoup

plus que le temps ne m'avait permis de le faire, je donne volontiers la préférence au nombre 0,00367 ou $\frac{1}{273}$ qu'il a obtenu par une méthode peu différente de la mienne, pour le coefficient de dilatation de l'air lorsqu'il reste soumis à une pression constante.

Rudberg est le premier qui ait appelé l'attention des physiciens sur la nécessité de changer le coefficient 0,00375, déterminé autrefois par M. Gay-Lussac, et confirmé par les recherches que Dulong et Petit avaient faites sur la marche comparative du thermomètre à air et du thermomètre à mercure. Rudberg avait trouvé pour sa valeur 0,00365; moyenne de diverses séries faites avec soin, en employant l'une des méthodes dont Dulong et Petit avaient fait usage. Plus tard, M. Magnus parvint au nombre 0,0036678. Son travail remarquable fut lu à l'Académie de Berlin peu de temps avant que M. Regnault donnât lecture du sien à l'Académie des sciences. M. Magnus avait trouvé aussi pour les coefficients de l'hydrogène, de l'acide carbonique et du gaz sulfureux, des nombres extrêmement peu différents de ceux que M. Regnault obtenait de son côté, et qu'il regarde comme définitifs.

Nous avons réuni dans le tableau suivant les résultats auxquels M. Regnault est parvenu, dans les recherches si complètes auxquelles il s'est livré sur ce sujet difficile et important.

Tableau des dilatations des Gaz à pression constante de 0 *à* 100°
(*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1842, t. V, p. 80).

Hydrogène..................................	0,366
Air atmosphérique..........................	0,367
Oxyde de carbone...........................	0,367
Acide carbonique...........................	0,371
Protoxyde d'azote..........................	0,372
Cyanogène..................................	0,388
Acide sulfureux............................	0,390

Par les divers procédés dont il a fait usage, M. Regnault a constaté que les dilatations augmentent avec la pression, mais très-inégalement pour les différents gaz. Sous 3 atmosphères et $\frac{1}{3}$, la dilatation de l'hydrogène conserve sa valeur 0,366; celle de l'air passe de 0,367 à 0,369; et celle de l'acide carbonique de 0,371 à 0,385.

La dilatation de l'acide sulfureux éprouve une augmentation

d'un tout autre ordre; sous la pression de 960 millimètres seulement, elle passe de 390 à 398.

Ces résultats remarquables montrent avec quelle réserve il faut admettre les lois générales qui paraissent les plus simples. Il est sans doute encore permis de dire, comme on l'a fait jusqu'à présent, que les gaz et les vapeurs ont le même coefficient de dilatation, et qu'il est indépendant de la densité; mais il ne faut regarder cette loi générale et simple que comme une approximation ou une sorte de limite vers laquelle tendent les phénomènes, et non pas comme une loi rigoureusement mathématique.

Afin de mieux faire comprendre la méthode que M. Regnault a imaginée pour obtenir les dilatations des gaz sous des pressions variables, nous emprunterons la description qu'il en a donnée (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1842, t. IV). On verra du reste qu'elle ne diffère pas de celle que j'avais donnée depuis plusieurs années.

« L'appareil consiste en un gros ballon *a* (Fig. 16, 17, 18) de 800 à 1000 centimètres cubes de capacité, auquel est soudé un tube thermométrique de 20 centimètres de long environ. Ce ballon sert de réservoir d'air, et doit être porté successivement de 0 à 100°; il est mis en communication avec un tube en siphon plein de mercure, qui sert à mesurer la force élastique de l'air.

« Un tube *ii'* de 16 à 17 millimètres de diamètre intérieur, parfaitement cylindrique, est mastiqué dans une pièce de fer *ih* à robinet *k*. Cette pièce porte une tubulure latérale *h*, dans laquelle on a mastiqué un second tube *hgfe* de même diamètre que le premier sur la longueur *fg*. Ce tube se termine en haut par un tube capillaire recourbé *fed*, qui a été pris sur le même tube thermométrique que le tube *b* soudé au ballon. Le tube *b* entre à frottement dans un petit tube de cuivre *c* à trois branches, 1, 2, 3, dans lequel il est mastiqué solidement. Dans la seconde branche 2, on a mastiqué un petit tube capillaire *p*, qui a été effilé à son extrémité.

« Le système des tubes *ii'* et *eh* est fixé sur une planche, qui est elle-même attachée solidement, et dans une position parfaitement verticale, sur un montant de fonte *ll'*.

« Le ballon *a* est assujetti d'une manière fixe dans un vase de fer-blanc *mn*, dans lequel on peut faire bouillir de l'eau ou

entourer le ballon de glace. Ce vase pose sur un trépied en fer *rqq'r'*. Un fourneau *o*, placé sur un support *s*, peut être placé sous le vase *mn* et retiré à volonté.

« Voici maintenant comment on dispose l'expérience. On met l'extremité ouverte du tube *p* en communication avec l'appareil à dessiccation (Fig. 17), qui se compose d'une pompe à main pour faire le vide, et de deux tubes à ponce et acide sulfurique; et pour fermer la branche 3, on y engage, au moyen d'un tube de caoutchouc, un bout de tube complétement fermé. On porte l'eau du vase *mn* à l'ébullition, et l'on fait un grand nombre de fois le vide dans le ballon *a*, en laissant rentrer l'air chaque fois très-lentement.

« Le tube *hgefd* a été desséché de la même manière à chaud avant d'être mastiqué dans la tubulure *h*, et l'on a versé immédiatement dans le tube *ii'* du mercure bien sec, de manière à remplir complétement le tube *hgf* jusqu'à son orifice *d*. De cette manière l'humidité ne pouvait pas pénétrer dans ce tube. On avait même soin de tenir l'extrémité du tube *d* recouverte avec un peu de caoutchouc.

« La boule *a* étant remplie d'air bien sec, on enlevait le bout du tube bouché qui était engagé pendant la dessiccation dans la tubulure 3, et l'on engageait dans cette tubulure, au moyen du caoutchouc, le tube capillaire *de*; ce tube entrait exactement dans la tubulure en cuivre, et venait se placer bout à bout sur le tube *b*; de sorte que dans le petit tube de cuivre *c*, il n'y avait de vide que les calibres des tubes thermométriques qui s'y trouvaient engagés. D'autres fois on fixait le tube *de* dans la tubulure au moyen de mastic.

« On ouvre le robinet *k*; le mercure qui s'écoule est remplacé dans le tube *efg* par de l'air qui a traversé l'appareil de dessiccation. On fait couler du mercure jusqu'à ce que le niveau affleure dans le tube *fg* un trait *t* marqué sur ce tube. Le mercure est d'ailleurs de niveau dans les deux tubes, puisque des deux côtés il communique librement avec l'air.

« On détache maintenant l'appareil de dessiccation, et l'on ferme à la lampe la pointe du tube *p*. On note en même temps la hauteur du baromètre.

« On enlève le fourneau qui maintient en ébullition l'eau du vase de fer-blanc, pour que le ballon *a* se refroidisse plus promptement, on fait écouler l'eau chaude en ouvrant le robinet *u*;

on enlève le couvercle $a'b'c'd'e'f'g'h'$, et l'on verse plusieurs fois de l'eau froide dans le vase pour refroidir ses parois. Enfin, on entoure le ballon a complétement de glace pilée, que l'on maintient par une toile attachée sur le bord $c'd'$ du vase.

« L'air se contractant par le refroidissement, le mercure monte dans le tube gf; mais on le maintient au même niveau t, en faisant couler du mercure par le robinet k.

« Lorsqu'on est sûr que l'air du ballon a a pris la température de la glace fondante, on note le baromètre h', et l'on mesure au moyen du cathétomètre la différence de niveau $tt' = z'$. On a déjà ainsi toutes les données nécessaires pour déterminer la dilatation de l'air; mais on peut obtenir une seconde détermination de la manière suivante :

« On engage la pointe fermée du tube p de nouveau dans l'appareil de dessiccation; on fait plusieurs fois de suite le vide dans cet appareil pour être sûr qu'il est rempli d'air bien sec, puis on casse la pointe du tube p. Le mercure descend alors dans le tube fg, mais on le maintient en t en versant du mercure par le tube ii'.

« Au bout d'un certain temps on ferme de nouveau au chalumeau la pointe du tube p, et l'on note la hauteur h'' du baromètre. On enlève maintenant la glace, on replace le couvercle $a'b'c'd'$ du vase de fer-blanc, et l'on porte de nouveau à l'ébullition l'eau placée dans le vase. En versant du mercure dans le tube ii', on maintient le niveau en t dans le tube fg. Quand le ballon a séjourné environ une heure dans l'eau bouillante, on note le baromètre h''', et l'on mesure la différence de niveau $tt'' = z''$ du mercure dans les deux colonnes.

« Dans le calcul de l'expérience il est nécessaire de tenir compte du petit volume d'air qui reste constamment à la température ambiante. Pour cela, il faut connaître le rapport de ce volume à la capacité du ballon a. Cette dernière capacité, v, avait été déterminée par un jaugeage à l'eau distillée, et le volume v' de l'air enfermé dans les tubes thermométriques, b, p, def, ainsi que dans la partie ft du tube plus large, a été mesuré par un jaugeage au mercure. On a eu ainsi :

$$\frac{v'}{v} = 0,002715.$$

« Le coefficient de dilatation du verre du ballon a été conclu

d'expériences faites sur d'autres ballons de même verre, mais plus petits; on l'a trouvé de 0,0000233.

« Les températures du petit volume d'air v', et celles du mercure des colonnes étaient indiquées par des thermomètres convenablement placés.

« La formule qui convient à la première période de l'expérience est la suivante :

$$1+at=\frac{(1+mt)h}{h'-z'-\frac{v'}{v}\cdot\frac{1}{1+at'}\cdot(h-h'+z')},$$

et celle qui convient à la seconde période est

$$1+at=\frac{(1+mt)(h+z)}{h'-\frac{v'}{v}\cdot\frac{1}{1+at'}\cdot(h+z-h')}.\text{ »}$$

t est la température de l'ébullition de l'eau, sous la pression barométrique h, de l'instant de l'observation; température qui se déduit de la hauteur du baromètre elle-même; pour cette correction, M. Regnault adopte, d'après M. Biot, $26^{mm},7$ pour la différence de pression correspondant à 1°.

t' est la température ambiante à laquelle est soumis le petit volume v'; elle est sensiblement la même dans l'observation relative à la glace fondante et dans celle qui est relative à l'eau bouillante.

h' est la hauteur du baromètre de l'instant où l'on fait l'observation de la glace fondante; z et z' sont les différences de niveau qui ont été observées dans les tubes fg et ii'; z' appartient à la première période de l'expérience, z à la seconde période.

m est le coefficient de dilatation du verre. On comprend que t, t' h, h', peuvent n'avoir pas les mêmes valeurs numériques dans la formule qui appartient à la première période et dans celle qui appartient à la seconde période de l'expérience.

Dans la première période, l'air du réservoir est, sous la pression atmosphérique, à la température de l'ébullition de l'eau; mais il retombe sous une pression de 55 centimètres seulement, lorsqu'on met le ballon dans la glace. Dans la seconde période, au contraire, l'air est sous la pression atmosphérique à 0, et il s'élève à une pression d'environ 104 centimètres à la température de l'ébullition.

Mais l'appareil se prête facilement à des différences de pressions plus grandes : en effet, pour obtenir des pressions beaucoup plus faibles que la pression atmosphérique, il suffit de donner au tube *fgh* beaucoup de hauteur au-dessus de la tubulure *h* ; au contraire, pour obtenir des pressions de deux ou trois atmosphères, il suffit de donner au tube *ii'* assez de hauteur. C'est ce que M. Regnault a réalisé dans d'autres séries d'expériences ; et c'est ainsi qu'il a obtenu les nombres que nous avons rapportés plus haut.

M. Regnault s'est encore servi du même procédé pour faire une nouvelle comparaison de la marche relative des thermomètres à air et à mercure. Pour cela, son ballon ou réservoir d'air était placé dans un bain d'huile, entouré de trois thermomètres à déversement, qui indiquaient les températures du thermomètre à mercure, tandis que le ballon, mis, comme dans les expériences précédentes, en communication avec les tubes *fgh* et *ii'*, indiquait les températures correspondantes marquées par le thermomètre à air.

Voici le résultat de cette comparaison, extrait de son mémoire de 1846 :

Thermomètre à air.	Thermomètre à mercure en verre ordinaire.	Thermomètre à mercure en cristal de Choisy.
0°	0°	0°
100	100	100
125	124,93	125,10
150	149,80	150,40
175	174,70	175,70
200	199,67	201,25
225	224,80	227,00
250	250,03	253,00
275	275,45	279,17
300	301,10	305,65
325	327,10	332,75

154. Pour apprécier des températures plus hautes que 350° ou 400°, les réservoirs de verre deviennent insuffisants ; il est nécessaire d'avoir recours à des réservoirs métalliques ; c'est pour cela que j'avais fait construire autrefois des réservoirs de platine, pour les adapter à l'appareil que j'ai décrit plus haut.

L'un de ces réservoirs est représenté dans la figure 3 ; à la tubulure *b* est adaptée, à vis, une tige de platine, qui est ensuite

soudée à l'or; elle est percée d'un trou d'environ 1 millimètre; une seconde tige, qui peut être d'argent, se réunit à la première au moyen du manchon c; enfin, la tige d'argent se recourbe et se termine par une sorte de bouchon qui vient s'adapter à la garniture du tube divisé t de la figure 10. Pour réduire le volume de l'air compris dans les tiges de platine et d'argent, on y engage un fil de platine de dimensions connues, qui cependant laisse aux gaz une libre circulation. On détermine par des jaugeages, comme nous l'avons dit précédemment, la capacité c du réservoir et la capacité z des tubes de communication : dans les divers réservoirs que j'ai employés, c était d'environ 60 centimètres cubes, et z d'environ 2 centimètres cubes. L'appareil se dessèche et se remplit d'air sec, et l'on procède ensuite exactement comme nous l'avons expliqué pour le réservoir de verre. La formule qui donne la température est la même, savoir :

$$t = \frac{d}{c(a-m)-ad};$$

t, température,
c, capacité du réservoir où l'air se chauffe,
a, coefficient de dilatation de l'air,
m, coefficient de dilatation du platine,
d, volume de l'air survenu dans le tube divisé par l'effet de la dilatation.

Nous avons vu comment la valeur de d s'obtient dans les réservoirs de verre; ici, il se présente un phénomène fort embarrassant pour des recherches précises : le réservoir de platine condense de l'air qui se dégage à une température voisine de 100°, et ce n'est qu'au-dessus de cette température qu'il se comporte réellement comme un réservoir de verre; aux températures inférieures, cet air, en quelque sorte dissimulé et se dégageant plus ou moins suivant la température et la pression, trouble toutes les observations exactes que l'on pourrait essayer de faire. Dans cet état de choses, il y a nécessité de suivre le pyromètre à air avec un thermomètre à mercure, jusqu'aux températures de 100 à 120°; les volumes d'air que l'on observe alors sont réduits par le calcul à ce qu'ils seraient à 0, si le phénomène d'absorption n'avait pas lieu; ce n'est qu'après avoir fait ces corrections et celles qui dépendent de la température du tube divisé que l'on parvient à obtenir les valeurs de d qui

entrent dans la formule et qui donnent la température cherchée.

La disposition des expériences est représentée dans la figure 8. *f* est un fourneau carré construit en briques réfractaires et approprié à ce genre d'expériences; c'est-à-dire qu'il est disposé pour que l'on puisse aisément y mettre du charbon et gouverner le feu, soit par la clef qui se trouve au tuyau *t*, soit par le registre qui ferme le cendrier *c*, l'air n'ayant aucune autre issue. *m* est une moufle de fer vue plus en grand (Fig. 6) portée sur de forts barreaux, et destinée à reçevoir le réservoir de platine: cette moufle se ferme aux deux bouts par des couvercles de fer; elle prend aisément dans toute son étendue une température uniforme qu'elle communique au réservoir de platine, parce qu'elle est de toutes parts environnée de charbons, et parce que le tirage se fait régulièrement au travers des barreaux de la grille, de manière à donner partout une combustion à peu près également active. Lorsqu'on veut faire une observation, on ferme le fourneau, et avec le cathétomètre on observe si le niveau du mercure se maintient bien immobile dans les deux tubes *t* et *s*; alors on note la division correspondante du tube *t*, ou plutôt la division du cathétomètre sur lequel le tube est repéré; on note en même temps la hauteur du baromètre, et la température ambiante du tube *t* et des tubes de communication.

J'ai fait ainsi diverses séries d'expériences : 1° pour évaluer les températures correspondantes aux diverses nuances de rouge; alors on regardait par un tube la couleur intérieure de la moufle et du réservoir; 2° pour déterminer la température de la fusion de l'or et de l'argent : alors on mettait dans la moufle, contre le réservoir, de petites coupelles contenant les métaux; 3° pour déterminer les capacités du platine pour la chaleur à diverses températures : alors on mettait dans la moufle, près du réservoir, un creuset de platine épais contenant une boule de même métal de 178 grammes (voy. IIe vol., *Calorimétrie*).

Les capacités du platine, en continuant la loi trouvée, m'ont permis d'apprécier ensuite les températures plus hautes que celles auxquelles je pouvais exposer mon appareil. Ces anciennes expériences ont été calculées avec le coefficient 0,00375. En attendant qu'elles puissent être reprises avec le nouveau coefficient 0,00367, je les reproduis dans le tableau suivant :

Couleurs du platine.	Températures.
Rouge naissant....................	525
Rouge sombre......................	700
Cerise naissant...................	800
Cerise............................	900
Cerise clair......................	1000
Orangé foncé......................	1100
Orangé clair......................	1200
Blanc.............................	1300
Blanc soudant.....................	1400
Blanc éblouissant.................	1500

Ces indications ne sont pas aussi vagues qu'elles pourraient le paraître au premier abord. Lorsqu'on est parvenu à étudier la marche comparative des nuances de la couleur et des degrés de chaleur marqués par le pyromètre à air, il est facile de se convaincre qu'avec un peu d'habitude on ne se trompe pas de 50° sur la véritable température d'un corps dont on peut observer la nuance sans reflets étrangers.

135. Application de la dilatation des gaz. — Symplézomètre de Bunten ou appareil destiné à mesurer la pression atmosphérique par la température de l'air. — Cet appareil est représenté dans la figure 15 : il se compose d'un thermomètre à alcool *ab*, et d'un tube à air *ced*, recourbé en *e*, et ouvert à son extrémité supérieure *d*. Le réservoir *c* du tube à air est *dans l'intérieur* du réservoir du thermomètre, de telle sorte qu'il se trouve enveloppé complétement par l'alcool ; la partie inférieure du réservoir et du tube à air contient une colonne d'huile d'amandes douces, colorée en rouge ; par l'ouverture *d* cette colonne reçoit sans cesse la pression atmosphérique ; l'autre extrémité de la colonne d'huile reçoit la pression de l'air enfermé en *c* et dans la partie supérieure du réservoir d'air. Il résulte de cette disposition que la température de l'air est toujours indiquée très-approximativement par le thermomètre à alcool. Cette température restant constante, il est évident que si la pression atmosphérique augmente, l'huile descendra dans la branche ouverte, et qu'elle montera au contraire si la pression atmosphérique diminue. De même, la pression étant constante, on voit que l'huile s'élève ou s'abaisse dans la branche ouverte,

suivant que la température s'élève ou s'abaisse. On conçoit donc qu'il soit possible de graduer l'appareil de telle sorte que les effets de la température étant connus, l'on puisse en déduire ceux de la pression, et par suite, la valeur absolue de cette pression en centimètres ou millimètres de mercure.

Voici comment on procède à cette graduation : on choisit un instant où le baromètre marque 760 millimètres, on met tout l'appareil à la glace fondante, et l'on marque le zéro sur l'échelle du thermomètre *ab*, et le point de 760 vis-à-vis le sommet de la colonne d'huile dans la branche ouverte du tube; ce point de 760 se marque sur une échelle mobile *m* qui se repère sur l'échelle fixe du thermomètre *ab*; la température restant 0, on produit une *dépression* qui soit, par exemple, de 30 millimètres dans l'air atmosphérique qui agit sur la branche ouverte; alors l'huile monte, et l'on marque 730 millimètres au point où elle s'arrête sur l'échelle mobile, qui toutefois est restée en place, toujours repérée sur l'échelle thermométrique. L'espace compris entre 760 et 730 se divise en 30 parties égales, dont chacune correspond à 1 millimètre de mercure; c'est-à-dire que la température étant 0, si la colonne d'huile correspond, par exemple, aux divisions 740 ou 750 de l'échelle mobile bien repérée et mise en place, on en conclut que la pression atmosphérique est de 740 ou 750 millimètres de mercure. La température restant toujours à 0, on produit encore sur l'air ambiant une *suppression* de 30 millimètres; le sommet de la colonne d'huile descend dans la branche fermée, et l'on marque de même 790 au point où elle s'arrête sur l'échelle mobile; l'espace compris entre 790 et 760 est un peu moindre que l'espace compris entre 760 et 730, mais il se divise comme lui en 30 parties égales dont chacune correspond à 1 millimètre de mercure.

Ainsi l'appareil est *gradué pour la température zéro;* c'est-à-dire qu'il est propre à marquer les pressions atmosphériques, toutes les fois que l'appareil sera à la température 0; il suffira en effet de *repérer d'abord l'échelle mobile des pressions* sur l'échelle thermométrique, et de lire ensuite sur la première la division qui correspond au sommet de la colonne d'huile.

La sensibilité de l'appareil dépend évidemment du chemin que parcourt le sommet de la colonne d'huile pour un changement

de pression d'un millimètre; et ce chemin parcouru x est lui-même donné par

$$x = \frac{\mp v}{\pi r^2 (1 \mp 760)}.$$

Le signe supérieur correspond à une diminution de pression, et le signe inférieur à une augmentation; v est le volume de l'air de l'appareil, et r le rayon du tube. On peut choisir v et r de telle sorte que x soit égal à 2, 3 ou 4 millimètres, c'est-à-dire de telle sorte que le sympiézomètre soit deux, trois ou quatre fois plus sensible que le baromètre.

Ce que nous avons dit de la graduation à 0 s'appliquerait tout aussi bien à une autre température, par exemple, à la température des caves de l'Observatoire, et, dans ce dernier cas, la graduation serait suffisante, parce que l'appareil devrait conserver toujours la température fixe de sa graduation. Mais il n'en est plus de même pour un appareil destiné à subir toutes les variations de température ambiante. Alors, si l'on veut lui donner une exactitude suffisante, il est nécessaire de répéter la même graduation pour une seconde température, par exemple à 15°, en procédant exactement comme nous l'avons indiqué pour la température 0. Seulement, après avoir repéré l'échelle mobile des pressions sur l'échelle fixe des températures, de manière que le 760 des 15° tombe sur elle au même point que le 760 de la température 0, il est évident que les nombres 730 et 790 des 15° iront tomber plus loin de part et d'autre de 760, et qu'il faudra en conséquence écrire ces nombres sur une autre ligne verticale de l'échelle mobile, en écrivant 15° au haut de cette ligne verticale, pour montrer qu'elle correspond à 15°. Si maintenant l'on joint par des lignes obliques les deux points 730 et les deux points 790, on aura une sorte de trapèze à côtés verticaux parallèles, sur les côtés obliques duquel il sera facile d'écrire les températures comprises entre 0 et 15°; et même en prolongeant ces côtés, on pourra aisément étendre la graduation à des températures plus basses que zéro et plus hautes que 15°.

Les sympiézomètres, construits et gradués avec soin, peuvent avoir, pour les voyages et surtout pour la marine, d'immenses avantages sur le baromètre, dont les observations à bord présentent toujours de si grandes difficultés.

CHAPITRE II.

De la Densité des Gaz, des Liquides et des Solides.

136. Nous avons vu (46) que le rapport des densités de deux corps est le même que celui de leurs poids spécifiques, et qu'il est égal au rapport direct des poids de ces corps multiplié par le rapport inverse de leurs volumes. Ainsi, la recherche expérimentale des densités se simplifie lorsqu'on peut opérer sur des volumes égaux ou sur des poids égaux : dans le premier cas, les densités sont entre elles comme les poids, et tout se réduit à des pesées ; dans le second cas, elles sont en raison inverse des volumes, et tout se réduit à l'estimation des volumes, qui peut pour certaines substances se faire avec une grande facilité. On a coutume de rapporter toutes les densités à celle de l'eau distillée, parce que l'eau se trouve partout, et parce qu'il est facile de l'obtenir parfaitement pure ; cependant la densité des gaz et des vapeurs se rapporte d'abord à celle de l'air atmosphérique, et c'est par le calcul qu'on les ramène ensuite à l'unité commune, c'est-à-dire à la densité de l'eau. Nous allons indiquer successivement les méthodes qui ont été employées pour déterminer les densités des gaz, des liquides et des solides.

137. Densité des gaz. — Pour déterminer les densités des gaz, on prend un grand ballon de 6 à 7 litres de capacité (Fig. 19, Pl. 9), que l'on pèse après y avoir fait le vide, et que l'on pèse ensuite après l'avoir rempli successivement d'air sec et du gaz dont on veut avoir la densité. S'il était possible de faire le vide parfait, et d'opérer exactement à la même température et à la même pression pour les trois pesées, on aurait facilement la densité du gaz par rapport à l'air. En effet, en représentant par p_1, p, p', les résultats de la 1re, de la 2^e et de la 3^e pesée ; par c les poids de l'air contenu dans le ballon ; par c' le poids du gaz, et par d le poids de l'air déplacé dans les trois expériences, poids qui serait le même, puisqu'on admet pour l'air extérieur, la même pression, la même température et le même état hygrométrique, on aura :

1re EXP. p_1+d, poids absolu de la matière du ballon.
2e $p+d-c$, *id.*
3e $p'+d-c'$, *id.*

car le poids de la matière du ballon est égal au *poids apparent* donné par la pesée, *plus* le poids perdu dans l'air, *moins* le poids de ce qui peut être contenu dans le ballon lui-même. Or ces trois valeurs du poids de la matière du ballon étant égales entre elles, on en déduit

$$c=p-p_1;\quad c'=p'-p_1;\quad \text{et}\quad \frac{c'}{c}=\frac{p'-p_1}{p-p_1};$$

pour le rapport des poids du gaz et de l'air, et par conséquent pour le rapport des densités, puisque les volumes sont égaux.

Mais l'expérience ne peut jamais avoir ce degré de simplicité, soit parce qu'il est impossible de faire le vide exactement, soit parce qu'il n'arrive presque jamais que l'on puisse faire l'opération complète, sans qu'il survienne des changements de température et de pression. Nous allons indiquer comment l'on tient compte de ces circonstances ; en remarquant que l'on peut toujours disposer l'appareil pour que la pesée du ballon plein succède immédiatement à la pesée du ballon vide, et se fasse par conséquent dans un air ambiant de même température et de même pression. Alors on fait pour l'air et pour chaque gaz une pesée du ballon vide et du ballon plein.

Pesée du ballon vide.

t, température de l'air ambiant et du ballon,
h, hauteur du baromètre,
d, poids de l'air déplacé,
h_1, pression de l'air qui reste dans le ballon,
c_1, poids *id.*
p_1, poids apparent du ballon donné par l'expérience.

Il en résulte pour le poids absolu de la matière du ballon,

$$p_1+d-c_1.$$

Pesée du ballon plein d'air sec.

t, température de l'air ambiant et du ballon,
h, hauteur du baromètre,
d, poids de l'air déplacé,

h, pression de l'air du ballon : c'est la pression atmosphérique,
c, poids de l'air qui remplit le ballon,
p, poids apparent donné par l'expérience.

Il en résulte pour le poids absolu de la matière du ballon,

$$p+d-c;$$

par conséquent

$$p+d-c_1=p+d-c; \quad \text{d'où} \quad c-c_1=p-p_1.$$

Les poids c et c_1 de l'air sont d'ailleurs entre eux comme les pressions h et h_1,

d'où $$c_1=\frac{c.h_1}{h},$$

et par suite $$c=\frac{h(p-p_1)}{h-h_1}.$$

Soient maintenant x le poids de 1 centimètre cube d'air à 0 sous la pression de 76 centimètres ; et n le nombre des centimètres cubes qui exprime la capacité du ballon à la température *zéro;* nx est alors le poids de l'air qui serait contenu dans le ballon à la température 0 et sous la pression de 76 centimètres. Il est facile d'en déduire le poids de l'air contenu dans le ballon, dans les conditions de l'expérience, c'est-à-dire à la température t, sous la pression h.

En effet, en passant de la pression de 76 à la pression h, le poids x de 1 centimètre cube devient

$$\frac{x.h}{76},$$

et en passant de 0 à la température t, il devient

$$x.\frac{h}{76}.\frac{1}{1+at}.$$

D'ailleurs, à cette température, le ballon ne contient plus seulement n centimètres cubes : par l'effet de la dilatation du verre, il en contient $n(1+kt)$; en multipliant ce volume par le poids de chaque centimètre cube, on obtient enfin

$$n(1+kt).x.\frac{h}{76}.\frac{1}{1+at},$$

pour le poids total de l'air contenu dans le ballon à la température t et sous la pression h. Ce poids est celui que nous avons

représenté par c, et que nous avons trouvé tout à l'heure égal à $\frac{h(p-p_1)}{h-h_1}$; en posant cette égalité, on en déduit enfin

$$nx = 76 \cdot \frac{p-p_1}{h-h_1} \cdot \frac{1+at}{1+kt}.$$

En procédant de même avec un autre gaz, à une température t', sous une pression h', on aurait trouvé des poids apparents p_1' et p', et en désignant par x' le poids de 1 centimètre cube de ce gaz à 0, sous la pression de 76, on aurait pareillement

$$nx' = 76 \cdot \frac{p'-p'_1}{h'-h'_1} \cdot \frac{1+at'}{1+kt'}.$$

Or, la densité de ce gaz par rapport à l'air est égale au rapport $\frac{x'}{x}$ des poids du centimètre cube de ce gaz, et du centimètre cube d'air, pris l'un et l'autre à 0 sous la pression de 76. On a donc enfin pour le rapport des densités

$$\frac{x'}{x} = \frac{p'-p'_1}{p-p_1} \cdot \frac{1+at}{1+at'} \cdot \frac{h-h_1}{h'-h'_1} \cdot \frac{1+kt'}{1+kt};$$

expression qui ne contient que les données de l'expérience.

Cette formule générale a été obtenue en admettant que les poids x et x' d'un centimètre cube d'air et de gaz à 0 sous 76 deviennent

$$x \cdot \frac{h}{760} \cdot \frac{1}{1+at}, \quad \text{et} \quad x' \cdot \frac{h}{760} \cdot \frac{1}{1+at},$$

conformément à la loi de Mariotte et à la constance du coefficient de dilatation. Dans ce cas, le rapport des densités est constant à toute température et à toute pression, puisque le rapport des poids de 1$^{c.c}$ est toujours $\frac{x'}{x}$. Mais il est facile de voir que, dans les limites où la loi de Mariotte cesse d'être vraie, l'expression précédente cesse d'être exacte; cependant, dans l'étendue où la loi de Mariotte est vraie, on peut toujours l'employer, pourvu que l'on mette pour le gaz le coefficient de dilatation qui lui appartient, et qui peut être différent de celui de l'air : seulement il arrive alors que le rapport des densités est variable avec la température : il est $\frac{x'}{x}$ à 0 et $\frac{x(1+at)}{x'(1+a't)}$ à la température t^0, en représentant par a' le coefficient de dilatation du gaz.

C'est la méthode que nous venons de décrire qui a servi à déterminer les densités des différents gaz par rapport à l'air; elle exige des précautions délicates; il faut employer des gaz très-purs et bien desséchés, observer avec soin les températures et les pressions, et opérer dans un air ambiant assez sec, pour n'avoir rien à redouter de la couche d'humidité qui s'attache aux parois du ballon. Il ne faudrait pas s'étonner, au reste, que pour certains gaz et pour certains ballons, on n'obtînt que de mauvais résultats à cause de la condensation que ces gaz éprouvent au contact de diverses substances.

138. Poids de 1 litre d'air. — *Composition de l'air atmosphérique.* Après avoir rapporté les densités des différents gaz à celle de l'air atmosphérique, il importe de trouver la densité de l'air par rapport à l'eau; c'est une donnée fondamentale dont on a sans cesse besoin. On y parvient par la méthode précédente : seulement, il faut avoir des balances assez fortes et assez sensibles pour peser avec exactitude le ballon de la densité des gaz, lorsqu'il est rempli d'eau distillée.

Supposons, en effet, que, par des expériences analogues à celles dont nous venons de parler, on ait déterminé plusieurs valeurs de nx, c'est-à-dire du poids de l'air que le ballon pourrait contenir à la température de 0 et sous la pression de 76^c; ces valeurs ne pourront avoir entre elles que de très-petites différences; on en prendra la moyenne, que je représente par r, et l'on aura ainsi

$$nx = r.$$

La valeur de r une fois connue avec une exactitude suffisante, il ne reste qu'à jauger le ballon, ou à déterminer le nombre n des centimètres cubes qu'il contient à 0. Pour cela, on fait, comme tout à l'heure, deux pesées dans les mêmes conditions de température et de pression pour l'air ambiant : la première avec le ballon plein d'air sec, et la seconde avec le ballon plein d'eau distillée. Soient θ la température, h la pression, d le poids de l'air déplacé, ϖ et ϖ' les résultats de la première et de la seconde pesée, u le poids de l'air qui remplit le ballon pour la première, et u' le poids de l'eau qui le remplit pour la seconde, on aura :

Première expérience, $\varpi' + d - u$, pour le poids absolu de la matière du ballon.

Deuxième expérience, $\varpi' + d - u'$, pour le poids absolu de la matière du ballon.

Par conséquent, $u' = \varpi' - \varpi + u$.

Mais r étant le poids de l'air contenu dans le ballon à la température 0 sous la pression de 76, il est facile de voir qu'à la température θ et sous la pression h, le poids u de l'air qui remplit le ballon sera

$$u = r \cdot \frac{h}{760} \cdot \frac{1 + k\theta}{1 + a\theta}.$$

En substituant cette valeur, u' sera connu. Or, au maximum de densité, 1^{gr} d'eau occupe $1^{c.c}$; et à la température θ il a un volume $(1 + \delta)$, δ étant donné par les tables de dilatation de l'eau; ainsi, le poids u' de l'eau correspond à un nombre de centimètres cubes égal à $u'(1 + \delta)$. Telle est donc la capacité du ballon à la température θ. D'une autre part, cette capacité est aussi $n(1 + k\theta)$; il en résulte

$$n = \frac{u'(1 + \delta)}{1 + k\theta}.$$

En substituant cette valeur de n dans l'équation primitive $nx = r$, on obtient enfin

$$x = \frac{r}{u'} \cdot \frac{1 + k\theta}{1 + \delta},$$

pour le poids du centimètre cube d'air sec, à 0 de température et 76 de pression.

MM. Arago et Biot ont trouvé, en 1805 :

Poids de 1^{cc} d'air $= 0^{gr},00129954$.
Poids de 1^{lit} d'air $= 1^{gr},29954$.

Ce résultat serait un peu modifié si l'on faisait les corrections en prenant pour les dilatations de l'eau et de l'air les nombres que l'on adopte aujourd'hui.

Comme la loi de Mariotte s'applique à l'air, il en résulte que, sauf les changements que le coefficient de dilatation peut éprouver, soit à raison de la pression, soit à raison de la température, on a pour la pression h et la température t ces expressions générales :

$$\text{Poids de } 1^{cc} \text{ d'air} = 0^{gr},00129954 \cdot \frac{h}{76} \cdot \frac{1}{1 + at}.$$

$$\text{Poids de } 1^{lit} \text{ d'air} = 1^{gr},29954 \cdot \frac{h}{76} \cdot \frac{1}{1 + at}.$$

D'après MM. Dumas et Boussingault, l'air est composé

En poids de		En volume de	
23,01	oxygène.	20,81	oxygène.
76,09	azote.	79,19	azote.
100,00		100,00	

La composition en poids est le résultat direct de l'expérience; la composition en volume s'en déduit par les densités de l'oxygène et de l'azote. Les nouvelles expériences de MM. Dumas et Boussingault donnent pour la densité de l'oxygène 1,1057, et pour celle de l'azote 0,9720.

Lorsque la densité d'un gaz, par rapport à l'air, est connue, il est facile d'en déduire son poids spécifique, ou le poids de 1 litre à 0 de température et 76 de pression. 1 litre d'air pesant $1^{gr},29954$, 1 litre de gaz de densité d pèse $d \times 1,29954$; c'est ainsi qu'a été formée la quatrième colonne du tableau général de la page 249.

139. Densité des gaz composés. — Dans toute combinaison binaire, il y a une relation essentielle entre les densités des composants et celle du composé. Représentons par d et d' les densités, par rapport à l'air, de deux gaz qui se combinent, et par n et n' les nombres des volumes du premier et du deuxième qui entrent dans la combinaison. Soient v le volume du composé et Δ sa densité, par rapport à l'air. En prenant pour unité le poids de l'unité de volume d'air, le poids du composé est évidemment $nd + n'd'$; et puisque son volume est v, on a

$$\Delta = \frac{nd + n'd'}{v}.$$

Suivant la belle loi de M. Gay-Lussac, les volumes n et n' des deux composants sont toujours entre eux en rapport simple, et de plus le volume v du composé a toujours aussi un rapport simple avec n ou n'. Exemples :

Protoxyde d'azote. Oxygène, $n = 1$; azote, $n' = 2$; protoxyde d'azote, $v = 2$.

D'où l'on tire

$$\Delta = \frac{d}{2} + d' = 0,5523 + 0,972 = 1,5243.$$

Bioxyde d'azote. Oxygène, $n=1$; azote, $n'=1$; bioxyde, $\nu=2$.

$$\Delta=\frac{d+d'}{2}=\frac{1,1057+0,972}{2}=\frac{2,0777}{2}=1,0388.$$

Eau. Oxygène, $n=1$; hydrogène, $n'=2$; vapeur d'eau, $\nu=2$.

$$\Delta=\frac{d}{2}+d'=0,5523+0,0691=0,6214.$$

Dans ce cas, l'on ne trouve la valeur de ν qu'en prenant la densité de la vapeur d'eau; et comme l'expérience donne un nombre voisin de 0,6214, on en conclut que $\nu=2$, car, d'après la loi de M. Gay-Lussac, ν ne peut pas être égal à 2 augmenté ou diminué d'une petite fraction.

Réciproquement, lorsque le composé est tel que l'on puisse trouver ν et Δ, on peut en déduire nd ou $n'd'$.

Acide carbonique. Oxygène, $n=1$; acide carbonique, $\nu=1$, $\Delta=1,5245$. On en déduit pour le carbone

$$n'd'=\nu\Delta-nd=1,5245-1,1057=0,4188.$$

Maintenant, pour avoir d', il faut connaître n', *et vice versa*. Or, ce n'est que par des analogies de composition, toujours incertaines, que l'on peut s'arrêter à une valeur pour n'. Cette loi si importante et si féconde ne peut cependant conduire qu'à des présomptions plus ou moins fondées sur la densité des vapeurs des corps solides. Ce que nous venons de dire pour les composés binaires de deux éléments s'applique aisément aux composés ternaires et aux composés de composés; les densités obtenues par ces calculs sont celles qui se trouvent dans la troisième colonne du tableau général.

DÉSIGNATION des FLUIDES ÉLASTIQUES.	DENSITÉS déterminées par expérience.	DENSITÉS calculées.	POIDS de 1 litre à 1° et 760mm. de press.	NOMS des OBSERVATEURS.
Air	1,0000	»	1,2991	
Gaz hydrogène	0,0688	»	0,0894	Berzél. et Dulong.
Id.	0,0691	»	0,0898	Boussing. et Dum.
Vapeur de carbone	»	0,4220	0,5482	
Gaz hydrogène proto-carburé	»	0,5596	0,7270	Thomson.
Id. ammoniacal	0,5967	0,5910	0,7752	Biot et Arago.
Vapeur d'eau	0,6235	0,6200	0,8100	Gay-Lussac.
Gaz hydrogène protophosphoré	0,8700	»	»	H. Davy.
Id. hydrogène perphosphoré	0,9022	»	»	Thomson.
Vapeur d'acide hydrocyanique	0,9476	0,9442	1,2310	Gay-Lussac.
Gaz oxyde de carbone	0,9569	0,9732	1,2431	Cruikshanks.
Id. azote	0,9757	»	1,2675	Berzél. et Dulong.
Id. *id.*	0,9720	»	1,2627	Boussing. et Dum.
Id. hydrogène bicarburé	»	0,9816	1,2752	Thomson.
Id. deutoxyde d'azote	1,0388	1,0390	1,3495	Bérard.
Id. oxygène	1,1026	»	1,4323	Berzél. et Dulong.
Id. *id.*	1,1057	»	1,4364	Boussing. et Dum.
Id. hydrosulfurique	1,1912	»	1,5475	Gay et Thénard.
Id. hydrochlorique	1,2474	1,2474	1,6205	Biot et Arago.
Id. acide carbonique	1,5245	»	1,9805	Berzél. et Dulong.
Id. protoxyde d'azote	1,5269	1,5269	1,9752	Colin.
Vapeur d'alcool absolu	1,6133	1,6016	2,0958	Gay-Lussac.
Gaz cyanogène	1,8064	1,8197	2,3467	*Id.*
Vapeur d'acide chlorocyanique	»	2,1228	2,7577	*Id.*
Gaz sulfureux	2,1930	»	2,8489	H. Davy.
Vapeur d'éther hydrochlorique	2,2190	2,2290	2,8827	Thénard.
Id. d'acide fluoborique	2,3120	2,3070	»	Gay-Lussac.
Gaz deutoxyde de chlore	»	2,3155	3,0081	J. Davy.
Id. chlore	2,4216	2,4260	3,2088	Gay et Thénard.
Vapeur d'éther sulfurique	2,5860	2,5830	3,3960	Gay-Lussac.
Id. d'hydrogène arséniqué	2,6950	2,6950	3,5020	Dumas.
Id. nitreuse	»	3,1800	4,1320	Colin et Robiquet.
Gaz chloroxycarbonique	»	3,3990	4,4156	J. Davy.
Vapeur d'hydrobicarbure de chlore	3,4430	3,4080	4,4730	
Id. d'acide fluorique silicé	3,6000	3,5970	»	Dumas.
Id. de chlorure de bore	3,9420	4,0790	5,1210	*Id.*
Gaz hydriodique	4,4288	4,3399	5,7719	Gay-Lussac.
Vapeur de protochlor. de phosph.	4,8750	4,8080	6,3530	Dumas.
Id. d'essence de térébenthine	5,0130	4,2110	6,5120	Gay-Lussac.
Id. d'éther hydriodique	5,4750	»	7,1120	*Id.*
Id. de chlorure de silicium	5,9390	5,9600	7,7150	Dumas.
Id. de protochlorure d'arsenic	6,3010	6,2970	8,1850	*Id.*
Id. de perchlorure de titane	6,8560	7,0470	8,8810	*Id.*
Id. de mercure	6,9760	6,9780	9,0620	*Id.*
Id. d'iode	8,7160	8,6120	11,3230	*Id.*
Id. de perchlorure d'étain	9,2000	8,9930	11,0510	*Id.*

140. Densité de l'eau distillée. — Tous les corps changent de volume à chaque instant, par l'influence de la chaleur ; ainsi à chaque instant ils changent de densité. Mais, dans la loi de ces variations, l'eau présente une exception remarquable : à partir de 0, lorsqu'on élève sa température, elle se retire sur elle-même au lieu de se dilater, et elle se retire de plus en plus

jusqu'à la température d'environ 4°; ensuite, en la chauffant davantage, elle commence à éprouver une expansion, comme font tous les autres corps, et, dès cet instant, sa dilatation est continuellement croissante jusqu'à l'ébullition. Vers la température de 4°, l'eau éprouve donc un *maximum de contraction*. Ce phénomène est frappant, lorsqu'on l'observe sur un thermomètre à eau dont chaque degré occupe une assez grande étendue. Ce thermomètre descend comme le thermomètre à mercure, lorsqu'on les plonge ensemble dans un bain liquide, qui est, par exemple, à 10°, et que l'on refroidit peu à peu; mais, aux approches du 4e degré, le refroidissement augmentant, et le thermomètre à mercure continuant de descendre, on voit le thermomètre à eau qui remonte comme si on le chauffait, et qui remonte ainsi jusqu'à la température de la glace. En poussant le refroidissement assez loin, l'eau du thermomètre se gèle et prend tout à coup un accroissement de volume très-considérable; on peut donc présumer qu'à partir de 4° les molécules liquides commencent à s'écarter l'une de l'autre, et qu'elles se préparent en quelque sorte à prendre les positions respectives qu'elles doivent avoir pour passer à l'état solide. L'appareil représenté dans la figure 21 (Pl. 9) peut servir aussi à montrer ce phénomène, car les thermomètres qui sont au-dessous de la ceinture de glace marquent 4°, tandis que ceux qui sont au-dessus marquent 0.

L'eau qui tient en dissolution quelques sels ou d'autres substances étrangères paraît, au moins dans quelques cas, présenter encore les propriétés du maximum de contraction, mais à une température plus basse, le point de congélation étant lui-même abaissé.

Ces phénomènes ne semblent d'abord que des exceptions fortuites et de peu d'importance, mais nous verrons plus tard qu'ils ont une grande influence sur la distribution de la chaleur dans l'étendue des mers et de tous les continents. C'est par là que, dans les latitudes élevées, les rivières, les lacs et les mers, peuvent rester liquides à une certaine profondeur, c'est par là que les êtres vivants qui peuplent les eaux peuvent se conserver dans toutes les saisons et se perpétuer; c'est par là, enfin, qu'il s'établit une circulation de chaleur entre les pôles et l'équateur, et une température moyenne qui est plus modérée dans tous les climats.

Le point précis du maximum de contraction, et les différentes densités de l'eau, à diverses températures, ont été l'objet d'un grand nombre de recherches.

On verra dans le tableau suivant les résultats que M. Despretz a obtenus par la méthode des thermomètres, c'est-à-dire en observant des thermomètres à eau, soumis à un refroidissement et à un réchauffement graduels, autour de la température du maximum de densité, et en faisant avec soin toutes les corrections dépendantes de la dilatation du verre. La discussion de toutes ces expériences relatives au maximum de densité lui donne 3°,997, c'est-à-dire, à très-peu près, 4°. Ses résultats s'étendent depuis — 9° jusqu'à 100°.

Densités et volumes de l'eau d'après M. Despretz.

Températ.	VOLUMES.	DENSITÉS.	Températ.	VOLUMES.	DENSITÉS.
—9	1,0016311	0,998371	46	1,01020	0,989903
—8	1,0013734	0,998628	47	1,01067	0,989442
—7	1,0011354	0,998865	48	1,01109	0,989032
—6	1,0009184	0,999082	49	1,01157	0,988562
—5	1,0006987	0,999302	50	1,01205	0,988093
—4	1,0005619	0,999437	51	1,01248	0,987674
—3	1,0004222	0,999577	52	1,01297	0,987196
—2	1,0003077	0,999692	53	1,01345	0,986728
—1	1,0002138	0,999786	54	1,01395	0,986243
0	1,0001269	0,999873	55	1,01445	0,985756
1	1,0000730	0,999927	56	1,01495	0,985270
2	1,0000331	0,999966	57	1,01547	0,984766
3	1,0000083	0,999999	58	1,01597	0,984281
4	1,0000000	1,000000	59	1,01647	0,983798
5	1,0000082	0,999999	60	1,01698	0,983303
6	1,0000309	0,999969	61	1,01752	0,982782
7	1,0000708	0,999929	62	1,01809	0,982231
8	1,0001216	0,999878	63	1,01862	0,981720
9	1,0001879	0,999812	64	1,01913	0,981229
10	1,0002684	0,999731	65	1,01967	0,980709
11	1,0003598	0,999640	66	1,02025	0,980152
12	1,0004724	0,999527	67	1,02085	0,979576
13	1,0005862	0,999414	68	1,02144	0,979010
14	1,0007146	0,999285	69	1,02200	0,978473
15	1,0008751	0,999125	70	1,02255	0,977947
16	1,0010215	0,999979	71	1,02315	0,977373
17	1,0012067	0,998794	72	1,02375	0,976800
18	1,00139	0,998612	73	1,02440	0,976181
19	1,00158	0,998422	74	1,02499	0,975619
20	1,00179	0,998213	75	1,02562	0,975018
21	1,00200	0,998004	76	1,02631	0,974364
22	1,00222	0,997784	77	1,02694	0,973766
23	1,00244	0,997566	78	1,02761	0,973132
24	1,00271	0,997297	79	1,02823	0,972545
25	1,00293	0,997078	80	1,02885	0,971959
26	1,00321	0,996800	81	1,02954	0,971307
27	1,00345	0,996562	82	1,03022	0,970666
28	1,00374	0,996274	83	1,03090	0,970027
29	1,00403	0,995986	84	1,03156	0,969465
30	1,00433	0,995688	85	1,03225	0,968757
31	1,00463	0,995391	86	1,03293	0,968120
32	1,00494	0,995084	87	1,03361	0,967482
33	1,00525	0,994777	88	1,03430	0,966837
34	1,00555	0,994480	89	1,03500	0,966183
35	1,00593	0,994104	90	1,03566	0,965567
36	1,00624	0,993799	91	1,03639	0,964887
37	1,00661	0,993433	92	1,03710	0,964227
38	1,00699	0,993058	93	1,03782	0,963558
39	1,00734	0,992713	94	1,03852	0,962908
40	1,00773	0,992329	95	1,03925	0,962232
41	1,00812	0,991945	96	1,03999	0,961547
42	1,00853	0,991542	97	1,04077	0,960827
43	1,00894	0,991139	98	1,04153	0,960125
44	1,00938	0,990707	99	1,04228	0,959434
45	1,00985	0,990246	100	1,04315	0,958634

141. Maximum de densité de l'eau de mer et des diverses dissolutions salines. — Il était important de savoir si l'eau de mer a aussi un maximum de densité, et à quelle température il se trouve. Plusieurs physiciens avaient fait des recherches à ce sujet; mais M. Despretz, en reprenant cette question, l'a traitée de la manière la plus complète, en confirmant le résultat auquel il est parvenu pour l'eau de mer, par les résultats non moins remarquables que lui ont présentés les dissolutions de différents sels à divers degrés de saturation. Nous avons réuni tous ces résultats dans le tableau suivant, avec des additions que M. Despretz a bien voulu nous communiquer, et qui ne se trouvent pas dans son mémoire imprimé.

SUBSTANCES.	DENSITÉS.	POIDS de la Substance sur 997,45 d'eau.	MAXIMUM.	POINT de congélation.	TEMPÉRATURE pendant la congélation.
Eau de mer.......	1,027 à 20°	»	— 3,67°	— 2,55°	— 1,88°
Chlorure de sodium.	1,009 6	12,346	+ 1,19	— 1,21	0,71
Id.	1,018 6,26	24,692	— 1,69	— 2,24	1,44
Id.	1,027 6,60	37,039	— 4,76	— 2,77	2,12
Id.	»	74,078	—16,00	— 4,30	»
Chlorure de calcium.	1,005 »	6,173	+ 3,24	— 0,38	— 0,22
Id.	1,010	12,346	+ 2,05	— 0,53	— 0,53
Id.	1,020	24,692	+ 0,06	— 1,12	— 1,03
Id.	1,034	37,039	— 2,43	— 3,92	— 1,61
Id.	1,060	74,078	—10,43	— 6,28	— 3,56
Sulfate de potasse...	1,005	6,173	+ 2,92	— 0,15	— 0,15
Id.	1,010	12,346	+ 1,91	— 0,27	— 0,27
Id.	1,020	24,692	— 0,10	— 0,56	— 0,56
Id.	1,030	37,039	— 2,28	— 2,09	— 0,77
Id.	1,058	74,078	— 8,37	— 4,08	— 1,50
Sulfate de soude....	1,006	6,173	+ 2,52	— 0,27	— 0,17
Id.	1,012	12,346	+ 1,15	— 1,14	— 0,33
Id.	1,023	24,692	— 1,51	— 0,83	— 0,69
Id.	1,034	37,039	— 4,33	— 2,39	— 1,10
Id.	1,066	74,078	—12,26	— 2,17	— 1,13
Carbonate de potasse.	1,033	37,039	— 3,95	— 3,21	— 1,17
Id.	1,064	74,078	—12,44	— 2,25	— 2,25
Carbonate de soude.	1,039	37,039	— 7,01	— 2,85	— 1,37
Id.	1,075	74,078	—17,30	— 2,20	— 2,02
Sulfate de cuivre...	»	57,996	— 0,62	— 1,32	— 0,37
Potasse pure......	1,032	37,039	— 5,64	— 2,40	— 2,03
Id.	1,062	74,078	—15,95	— 4,33	— 4,33
Alcool...........	0,988	74,078	+ 2,30	— 2,83	— 2,83
Acide sulfurique...	1,008	12,346	+ 0,60	— 0,47	— 0,47
Id.	1,016	24,692	— 1,92	— 1,09	— 0,90
Id.	1,024	37,039	— 5,02	— 1,34	— 1,34

142. Densité des liquides. — Le principe d'Archimède, servant à comparer entre elles les densités de l'eau à diverses températures, peut servir pareillement à trouver les densités de tous les liquides. Si l'on veut, par exemple, connaître la densité de l'alcool par rapport à celle de l'eau, il suffira de prendre un corps solide plus dense que ces liquides et d'en faire trois pesées successives :

La première dans l'air ;

La seconde dans l'eau ;

La troisième dans l'alcool.

La perte de poids que ce corps fait dans l'eau est égale au poids qu'il déplace (**86**), et la perte de poids qu'il fait dans l'alcool est pareillement égale au poids de l'alcool déplacé. Or, la température étant la même, les volumes des liquides déplacés sont aussi les mêmes, donc le rapport de leur poids est égal au rapport de leur densité. Quand les pesées sont faites à des températures différentes, on les réduit, par le calcul, à ce qu'elles seraient à la température 0; mais pour cela il faut connaître la loi de dilatation du corps plongé et de celle de chaque liquide.

On peut déterminer aussi la densité des liquides par les *pesées directes* d'un même volume de tous ces corps. Pour y parvenir par ce second procédé, on prend un petit flacon de verre mince et léger (Fig. 20), ayant un bouchon foré et bien rodé qui le ferme d'une manière très-exacte. On le pèse seul, et on le pèse ensuite rempli d'un liquide. La différence des poids est le poids du liquide qu'il contient.

Par exemple : le flacon seul pèse..............	100 gr.
le flacon plein d'eau à 0 pèse.....	200 »
Le poids de l'eau contenue dans le flacon est.....	100 »
A la même température de 0	
le flacon seul pèse toujours.......	100 gr.
le flacon plein d'alcool pèse.......	179 »
Le poids de l'alcool contenu dans le flacon est....	79 »

Les volumes d'eau et d'alcool étant les mêmes, les densités de ces liquides sont entre elles comme les poids; donc

La densité de l'alcool est........................ 0,79

Lorsque la température n'est pas à 0, il faut corriger les ré-

sultats des effets que produit la dilatation sur le verre du flacon et sur les liquides que l'on soumet à l'expérience.

143. Jaugeage par les pesées. — Dans un grand nombre de recherches on est obligé de connaître exactement la capacité des vases de différentes formes qui servent aux expériences, et l'on y parvient en général de deux manières : 1° *par les volumes*, en versant dans des tubes gradués ou dans des éprouvettes le liquide qu'ils peuvent contenir; 2° *par les poids*, en faisant la pesée du vase plein d'air et la pesée du vase plein d'un liquide de densité connue.

Le premier procédé n'exige que peu de soins, seulement il faut que les appareils soient gradués avec précision, et il faut employer un liquide, comme le mercure, qui ne s'attache pas aux parois. Alors connaissant le coefficient de dilatation de la matière du vase, celui de l'éprouvette et celui du liquide; connaissant de plus la température à laquelle l'éprouvette a été graduée, il est facile d'obtenir la capacité du vase pour la température 0 et pour toutes les autres températures.

Le second procédé n'est pas aussi simple, mais il conduit à des résultats plus rigoureux lorsqu'il est employé avec les précautions convenables. Prenons pour exemple un ballon : après l'avoir desséché en dedans et en dehors, on le remplit d'air sec et on le pèse ouvert, en notant la température t et la hauteur barométrique h; soient p le poids apparent que l'on obtient, d le poids de l'air qu'il déplace, et c le poids de l'air qu'il contient, l'on a (**137**) pour le poids de la matière du ballon

$$p + d - c;$$

ensuite on le remplit d'un liquide, en chassant l'air avec soin, et on le pèse de nouveau, en notant de même la température t' et la hauteur barométrique h'; soient p' le poids apparent que l'on obtient, d' le poids de l'air déplacé, et c' le poids du liquide qu'il contient, on a pareillement, pour le poids de la matière,

$$p' + d' - c',$$

et par conséquent

$$p + d - c = p' + d' - c'; \quad c' = p' - p + d' - d + c.$$

Pour éviter des corrections incertaines sur l'état hygrométrique de l'air ambiant, on doit toujours mettre peu d'intervalle entre ces deux pesées; alors les valeurs de h et h', de t et t', sont, en

général, assez voisines pour que l'on puisse prendre $d = d'$, et la valeur de c' se réduit à

$$c' = p' - p + c.$$

Soient, pour les conditions de l'expérience, v' la capacité du ballon en centimètres cubes, ϖ le poids spécifique de l'air, ϖ' celui du liquide, on a $c = v'\varpi$, $c' = v'\varpi'$, et par suite,

$$v' = \frac{p' - p}{\varpi' - \varpi}.$$

En représentant par v la capacité à 0, on aurait

$$v' = v(1 + kt), \quad \text{et} \quad v = \frac{p' - p}{\varpi' - \varpi} \cdot \frac{1}{1 + kt}.$$

Si le liquide dont on s'est servi est de l'eau, on trouvera ϖ', au moyen de la table des dilatations de l'eau; si c'est du mercure, on aura

$$\varpi' = \frac{13^{gr},598}{1 + mt},$$

m étant le coefficient de dilatation du mercure ou 0,00018; quant à la valeur de ϖ, elle est, comme nous avons vu (pag. 244),

$$\varpi = 0^{gr},0012995 \cdot \frac{h}{76} \cdot \frac{1}{1 + at}.$$

144. Des aréomètres. — Les aréomètres sont des flotteurs qui donnent immédiatement les densités des liquides dans lesquels ils s'enfoncent.

On distingue deux sortes d'aréomètres : les aréomètres à poids variable et les aréomètres à volume variable.

La figure 24 représente un *aréomètre à poids variable*; v est le *volume* ou le *corps* de l'instrument; on le fait de verre ou de métal; l est le *lest*, c'est-à-dire une petite masse de mercure ou de plomb que l'on ajuste à la partie inférieure; t est la *tige*, qui doit être très-déliée; enfin c est le *chapeau*, sur lequel on doit mettre des poids. Quand l'instrument est dans un liquide, il se dispose d'après les conditions d'équilibre des corps flottants; il se tient debout, à cause du lest qui rabaisse son centre de gravité, et il s'enfonce jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre son poids et le poids du liquide qu'il déplace; alors on ajoute des *poids additionnels* sur le chapeau pour *affleurer* l'instrument,

c'est-à-dire pour qu'un petit trait *f*, marqué sur la tige, se trouve exactement *à fleur d'eau*. Dans les différents liquides il faut des poids différents pour produire l'affleurement, et c'est pour cela qu'on l'appelle un aréomètre à poids variable. Soient p le poids de l'instrument, a le poids additionnel qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'eau à 0, a' le poids additionnel qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'alcool à 0 : la densité de l'alcool sera à la densité de l'eau comme $p + a'$ est à $p + a$.

L'aréomètre est d'autant plus sensible que le volume plongé est plus considérable et la tige plus fine.

On conçoit que, pour éviter les calculs, il est possible de former pour chaque instrument une table particulière où l'on trouve immédiatement la densité à côté du poids additionnel a'.

L'*aréomètre à volume variable* représenté (Fig. 23) a en général moins de volume que l'aréomètre à poids variable : la tige est un petit tube de verre creux ; le corps de l'instrument est un cylindre ou une boule soufflée à l'extrémité du tube ; et le lest se loge dans le petit appendice en verre qui est au-dessous de la boule ; une bande de papier est soigneusement fixée dans l'intérieur de la tige pour porter les divisions qui marquent les densités. Le poids de cet aréomètre étant constant, il en résulte que les densités des liquides dans lesquels il s'enfonce sont entre elles en raison inverse des volumes plongés. C'est d'après ce principe que l'on fait la graduation, et l'on écrit sur la bande de papier qui sert d'échelle les nombres qui expriment directement les densités des liquides. Ainsi quand l'aréomètre n'enfonce que jusqu'au nombre 1200, la densité est 1200 ; s'il enfonce jusqu'au nombre 900, la densité est 900, etc., la densité de l'eau étant représentée par 1000.

Les *pèse-liqueurs* sont des espèces d'aréomètres qui ne sont pas gradués pour donner les densités des liqueurs dans lesquelles on les plonge, mais seulement pour donner leur *degré de concentration*. Les *acides* sont *étendus* d'une quantité d'eau plus ou moins grande, les *dissolutions salines* sont plus ou moins *saturées*, les *eaux-de-vie* et les *esprits* sont plus ou moins *riches en alcool ;* et l'on fait des *pèse-acides*, des *pèse-sels*, des *pèse-esprits*, des *pèse-sirops*, etc., pour reconnaître immédiatement les différents états dans lesquels ces liquides peuvent se présenter.

Pèse-acide ou aréomètre de Baumé. — Cet aréomètre a toute l'apparence d'un aréomètre à volume variable, mais il en

diffère essentiellement par sa graduation. Au point où il s'arrête dans l'eau pure, on marque 0; au point où il s'arrête dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 de sel ordinaire, on marque 15; on divise l'intervalle en 15 parties et l'on continue les divisions au-dessous. Deux dissolutions saturées à divers degrés marqueront évidemment des degrés différents sur l'aréomètre, mais il faudra calculer une table spéciale pour passer des degrés de l'aréomètre aux véritables densités.

Les *pèse-sels* et les *pèse-esprits* sont gradués d'après des principes analogues; ils ne sont donc, comme le *pèse-acides*, que des instruments de commerce, à moins que l'on n'ait dressé une table des proportions de sel ou d'esprit correspondantes à chaque degré.

L'*alcoomètre centésimal* de M. Gay-Lussac est fondé sur d'autres principes. Étant donnés des esprits ou des eaux-de-vie, il suffit d'y plonger l'alcoomètre pour connaître à l'instant leur force réelle, leur richesse en alcool et leur densité. Cet instrument, qui offre d'immenses avantages à la régie et au commerce, repose sur des recherches très-précieuses pour la science. (Voy. *l'Instruction*, etc., Gay-Lussac, 1824.)

145. Densité des corps solides. — On détermine les densités des solides, comme celle des liquides, par trois procédés différents, savoir : au moyen de l'aréomètre, du flacon bouché, ou de la balance hydrostatique.

L'aréomètre que l'on emploie pour déterminer les densités des corps solides est un aréomètre à volume constant, qui s'appelle aréomètre de *Fahrenheit*, ou aréomètre de *Nicholson*, ou aréomètre-balance de *Charles*, suivant quelques légères modifications dans la disposition des pièces. La figure 24 représente l'aréomètre de Charles. Entre le corps *v* de l'instrument et le lest *l*, se trouve un petit panier ou un petit seau d'argent destiné à recevoir les fragments de matière dont on cherche la densité. Quand les corps sont plus pesants que l'eau, ils doivent exercer une pression de haut en bas, et le panier est accroché par l'anse afin de recevoir cette pression : quand les corps sont spécifiquement plus légers que l'eau, ils pressent de bas en haut; alors on retourne le panier et on l'accroche par le fond, afin qu'il reçoive encore cette pression.

Pour trouver une densité par ce moyen, il faut, avant tout, connaître le *poids additionnel* qui doit être mis sur le chapeau

pour affleurer l'instrument dans l'eau distillée, c'est-à-dire pour le faire enfoncer jusqu'au trait f que porte la tige. Supposons qu'à la température 0, le poids additionnel soit de 25 grammes, et, avec cette donnée, cherchons la densité d'un corps quelconque, d'un diamant, par exemple. On met le diamant seul sur le chapeau, et on ajoute successivement des poids jusqu'à produire l'affleurement : soit 23gr,8 ce qu'il faut ajouter; ces poids et le diamant équivalent ensemble à 25 grammes, puisque l'affleurement a lieu. Donc le diamant pèse 25—23gr,8 ou 1gr,2; tel est son poids dans l'air. Alors, on met le diamant dans le panier d'argent, et aux 23gr,8 qui sont restés sur le chapeau, on ajoute ce qui est nécessaire pour l'affleurement : 0gr,34 suffisent pour cet effet; donc, 0gr,34 représentent le poids que le diamant perd dans l'eau, et par conséquent le poids d'eau qu'il déplace ou le poids d'un volume d'eau qui est égal au sien. Or, à volume égal, les densités sont entre elles comme les poids; donc, la densité du diamant est $\frac{120}{34}$ ou 3,53.

Pour les corps plus légers que l'eau, le procédé est le même, avec cette seule différence, qu'il faut retourner le panier et l'accrocher par le fond; il n'y a rien à changer ni dans les raisonnements ni dans les calculs. Lorsque la température n'est pas 0, on fait les corrections.

Le flacon bouché qui sert à la recherche des densités contient environ 2 ou 3 décilitres d'eau (Fig. 22). L'exactitude de l'expérience dépend en grande partie de la précision avec laquelle le bouchon est travaillé : il faut qu'il soit légèrement conique, bien usé à l'émeri, et parfaitement circulaire dans tout son contour, afin qu'il s'enfonce exactement de la même quantité dans toutes ses positions. Alors on procède de la manière suivante : on fait trois pesées : la première, pour avoir le poids p du corps solide dont on cherche la densité; la seconde, pour avoir le poids $f+p$ du flacon plein d'eau et du corps solide mis à côté de lui dans le même bassin; la troisième, pour avoir le poids f' du flacon et du corps solide mis dans son intérieur et ayant chassé par conséquent un volume d'eau égal au sien. La troisième pesée retranchée de la deuxième, c'est-à-dire $f+p-f'$, donne le poids du volume d'eau chassé; et, puisqu'à volume égal les densités sont comme les poids, la densité du corp est $\frac{p}{f+p-f'}$. Quand la température n'est pas 0, il faut

faire les corrections. Ce procédé ne peut s'appliquer qu'à de petites masses; il importe peu qu'elles soient spécifiquement plus pesantes ou plus légères que l'eau.

Les corps qui sont solubles dans l'eau se pèsent dans l'alcool, ou dans des dissolutions saturées.

Les corps poreux et susceptibles de s'imbiber ont des densités variables suivant le degré d'imbibition : il est difficile de les déterminer avec exactitude.

La balance hydrostatique qui nous a servi à démontrer le principe d'Archimède peut nous servir aussi à trouver les densités des corps solides. Pour l'employer à cet usage, elle n'a besoin d'aucune modification. Le procédé se réduit à faire deux pesées : par la première, on trouve le poids p du corps; par la seconde, on trouve la perte de poids e qu'il éprouve dans l'eau, et cette perte de poids est le poids du volume d'eau déplacé; donc, la densité est $\frac{p}{e}$. Si la température n'est pas 0, on fait les corrections.

Nous devons remarquer qu'à la même température la densité d'un corps solide n'est pas toujours exactement la même, elle varie entre certaines limites suivant l'état d'agrégation moléculaire : ainsi les monnaies et les médailles ont en général une densité un peu plus grande que les alliages fondus qui servent à les fabriquer; les cristaux ont quelquefois une densité notablement plus grande que celle de la substance qui les compose, prise à l'état amorphe, M. Hittorff a trouvé, par exemple, que la densité du sélénium cristallisé est de 4,80, tandis que celle du sélénium amorphe reste comprise entre 4,26 et 4,28; M. Deville a trouvé pareillement pour le soufre amorphe 2,039, pour le soufre en octaèdres de la Sicile 2,068 à 2,074, pour le soufre en octaèdres plus aigus de la Guadeloupe 2,063, comme pour celui qui est cristallisé artificiellement par la voie humide; enfin ayant soumis à l'épreuve le *soufre mou*, il a trouvé immédiatement après la coulée, pour celui qui est jaune 1,928, pour celui qui est rouge 1,919, ces densités croissant progressivement avec le temps, par un travail moléculaire intérieur, sont devenues après onze mois, pour le premier, 2,061 et pour le second 2,051.

Les trois tableaux suivants contiennent, pour les solides et les liquides, les densités les plus authentiques et les plus usuelles.

Table de la densité des corps solides à 0 de température, en prenant pour unité la densité de l'eau.

Platine… écroui	23,000	Flint-glass (anglais	3,329
laminé	22,669	Tourmaline (verte)	3,155
passé à la filière	21,042	Marbre de Paros	2,837
forgé	20,338	Émeraude verte	2,775
purifié	19,500	Perle	2,750
Or… forgé	19,362	Corail	2,680
fondu	19,258	Cristal de roche pur	2,653
Iridium	18,600	Aluminium	2,560
Tungstène	17,600	Verre de Saint-Gobain	2,488
Plomb fondu	11,352	Porcelaine de la Chine	2,384
Palladium	11,300	Chaux sulfatée cristallisée	2,311
Rhodium	11,000	Porcelaine de Sèvres	2,145
Argent fondu	11,474	Soufre natif	2,033
Bismuth fondu	9,822	Ivoire	1,917
Cuivre en fil	8,878	Albâtre	1,874
Cadmium	8,694	Anthracite	1,800
Molybdène	8,611	Phosphore	1,770
Laiton	8,393	Houille compacte	1,329
Arsenic	8,308	Jayet	1,259
Nickel fondu	8,279	Succin	1,078
Urane	8,100	Sodium	0,972
Acier non écroui	7,816	Potassium	0,865
Cobalt fondu	7,812	Bois de hêtre	0,852
Fer en barre	7,788	Frêne	0,745
Étain fondu	7,291	If	0,807
Fer fondu	7,207	Bois d'orme	0,800
Zinc fondu	6,861	Pommier	0,733
Manganèse	6,850	Bois d'oranger	0,705
Antimoine fondu	6,712	Sapin jaune	0,657
Tellure	6,115	Glace	0,930
Chrome	5,900	Tilleul	0,604
Iode	4,948	Bois de cyprès	0,598
Sélénium	4,320	Bois de cèdre	0,561
Diamants les plus lourds (légèrement colorés en rose	3,531	Bois de sassafras	0,482
		Peuplier ordinaire	0,383
Id. les plus légers	3,501	Liége	0,240

Densité de quelques minéraux réduits en poudre d'après Beudant.

Sulfure de plomb	7,759	Aragonite	2,947
Carbonate de plomb	6,729	Carbonate de chaux	2,723
Malachite	3,590	Quarz	2,654
Sulfate de strontiane	2,959	Gypse	2,332

Densité de quelques liquides à 0.

Eau distillée	1,000	Eau de mer	1,026
Mercure	13,598	Vin de Bordeaux	0,994
Acide sulfurique	1,841	Vin de Bourgogne	0,921
Acide nitrique	1,217	Huile essent. de térébenthine	0,870
Lait	1,030	Huile d'olive	0,915

Table des densités de divers liquides d'après les expériences de M. Pierre.

(Voy. les mêmes substances aux articles Dilatation et Points d'ébullition).

Noms des substances.	Densités à 0°.	Noms des substances.	Densités à 0°.
1. Acétate d'oxyde d'éthyle.....	0,90691	20. Chlorure d'éthyle bichloré....	1,34651
2. *Id.* *Id.* de méthyle..	0,86684	21. *Id.* d'amyle..........	0,89584
3. Acide butyrique monohydraté...................	0,99165	22. *Id.* de carbone........	1,64900
4. Acide sulfureux anhydre (à — 20°,48).............	1,49110	23. Chlorure (bi) de carbone.....	1,62983
5. Alcool éthylique...........	0,81509	24. Chlorure (tri) de phosphore...	1,61616
6. *Id.* méthylique..........	0,82074	25. Chlorure (tri) d'arsenic......	2,20495
7. *Id.* amylique............	0,82705	26. Chlorure de silicium.........	1,52371
8. Aldéhyde................	0,80551	27. Chlorure (bi) d'étain........	2,26712
9. Brome...................	3,18718	28. Chlorure (bi) de titane.......	1,76088
10. Bromure d'éthyle...........	1,47320	29. Éther sulfureux............	1,10634
11. *Id.* de méthyle.........	1,64443	30. Éther sulfurique...........	0,73581
12. *Id.* d'amyle...........	1,16576	31. Formiate d'oxyde d'éthyle...	0,93565
13. *Id.* de silicium........	2,81280	32. Iodure d'éthyle............	1,97546
14. *Id.* de phosphore.......	2,92189	33. *Id.* de méthyle..........	2,19922
15. Butyrate d'oxyde d'éthyle...	0,90193	34. Liqueur des Hollandais......	1,28034
16. *Id.* *id.* de méthyle..	1,02928	35. *Id.* monochlorée........	1,42234
17. Chloroforme..............	1,52523	36. *Id.* bichlorée..........	1,61158
18. Chlorure d'éthyle..........	0,92138	37. *Id.* trichlorée..........	1,66267
19. *Id.* *id.* monochloré.	1,24074	38. Sulfure de carbone..........	1,29312
		39. Sulfure (bi) de méthyle......	1,06358
		40. Térébène................	0,87179

DEUXIÈME SECTION.

CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS.

CHAPITRE PREMIER.

De la Fusion et de la Solidification.

146. Fusion. — Il est facile de reconnaître que la *fusion* ou le passage de l'état solide à l'état liquide est un phénomène produit par la chaleur, et qu'aucune autre cause dans la nature ne peut déterminer les corps à ce changement d'état. La glace peut être brisée ou réduite en poussière, elle peut être soumise à toutes les puissances mécaniques et à tous les agents naturels sans cesser d'être un corps solide, à moins que la chaleur ne vienne exercer sur elle son action pour la convertir en eau. Il en est de même de la cire, et, lorsqu'on la voit fondre aux rayons du soleil, on sait bien que c'est par l'effet de la chaleur qu'elle entre en fusion, et non par l'effet de la lumière. Et, si le plomb peut se liquéfier et devenir coulant lorsqu'on le bat sur une enclume à coups redoublés, c'est que la compression et la percussion dégagent de la chaleur tout à fait semblable à la chaleur d'un foyer. Ainsi, l'état de solidité ou de fluidité d'un corps est un état relatif, dépendant uniquement de la température à laquelle ce corps est soumis. A une autre distance du soleil, la terre prendrait une autre consistance et un autre aspect : si elle en était plus voisine, les métaux seraient pour la plupart dans un état habituel de fusion, et les profondeurs de la mer, au lieu d'être remplies d'eau, pourraient bien être remplies de substances métalliques liquéfiées : au contraire, si elle en était plus éloignée, la mer serait une masse solide, il n'y aurait plus d'eau coulante et probablement plus de liquide en circulation pour produire les phénomènes organiques de la végétation et de la vie.

La chaleur pénétrant et dilatant tous les corps, il est curieux

de chercher si elle peut pareillement les faire passer tous sans exception de l'état solide à l'état liquide. Or, en examinant sous ce point de vue tous les corps solides, on trouve entre eux de grandes différences : il y en a qui sont très-*fusibles*, et qui ne peuvent soutenir des températures même très-basses sans passer à l'état liquide : tels sont la glace, le phosphore, le soufre, la cire, les corps gras et les résines ; il y en a d'autres qui exigent, pour se fondre, des températures un peu plus élevées, comme l'étain, le plomb et divers alliages ; enfin, il y en a qui ne peuvent entrer en fusion que par des feux longtemps soutenus et aux plus hautes températures que nous soyons capables de produire : l'or, l'acier, le fer et le platine sont dans ce cas. Les corps qui résistent à ces plus hauts degrés de chaleur sont appelés *infusibles fixes* ou *réfractaires;* et, comme nos moyens de développer de la chaleur se perfectionnent de jour en jour, le nombre des substances infusibles a été sans cesse en diminuant. Ainsi, avec le chalumeau à gaz oxygène, M. Gaudin est parvenu à fondre le cristal de roche regardé jusque-là comme infusible, ou du moins à le ramollir à tel point qu'il se tire en fils fins comme la soie, et qu'il se façonne en globules parfaitement ronds, propres à faire des lentilles de microscope. Le charbon paraît être le plus réfractaire de tous les corps, quelques physiciens prétendent avoir observé des traces de fusion sur les arêtes des diamants qu'ils soumettaient à l'essai ; en attendant que ce résultat soit bien constaté, on peut du moins conclure par analogie qu'il n'y a pas de corps essentiellement infusibles.

Les substances organiques, étant en général composées de carbone et d'éléments gazeux plus ou moins volatils, se décomposent souvent par l'action du feu plutôt que de se liquéfier. Le bois fortement chauffé se carbonise et ne se fond pas ; il en est de même des fruits, des fleurs et des autres tissus végétaux ; il en est de même encore des fibres musculaires et de tous les autres tissus des corps vivants. Toutes ces substances organiques se décomposent par la chaleur : les produits volatils s'exhalent ; et il ne reste en dernier résultat que le charbon et les autres éléments fixes qui leur servent de bases.

Plusieurs corps inorganiques se décomposent aussi avant de se fondre, et il a fallu l'esprit inventif de Hall pour démontrer leur fusibilité. Son procédé consiste à chauffer ces corps en les maintenant sous une haute pression, de telle sorte que les élé-

ments les plus volatils ne puissent pas s'exhaler. C'est ainsi que Hall a fait fondre du marbre sans qu'il se convertît en chaux, et qu'il a démontré pareillement la fusibilité d'un grand nombre de substances volcaniques. Ces résultats sont importants pour discuter l'origine et la formation des diverses couches dont se compose la terre.

147. Conditions de la fusion. — Lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, ils présentent, en général, deux phénomènes remarquables (**123**) : premièrement, ils restent solides jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à une certaine température *fixe*, qui est toujours la même pour le même corps, et c'est alors seulement que la fusion peut commencer; secondement, ils restent à la même température pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit la quantité de calorique qu'on leur fournisse; d'où il suit qu'ils absorbent ce calorique pour se fondre, et qu'ils le cachent dans leur intérieur sans en laisser rien paraître au dehors. Ainsi, *la fixité de température* et *l'absorption du calorique latent* sont les *deux conditions* essentielles de la fusion. Ces phénomènes peuvent être facilement constatés sur les corps très-fusibles, dont la température est accessible au thermomètre à mercure, et ils peuvent l'être encore sur les substances peu fusibles, dont on obtient la température par d'autres moyens. Il y avait près de cent ans que le thermomètre était inventé, que l'on ne connaissait pas encore d'une manière certaine l'invariabilité du point de fusion des corps : on croyait que la glace, par exemple, devait entrer en fusion à diverses températures, suivant la latitude ou l'élévation des lieux où elle était formée. La première condition de la fusion une fois démontrée, il fallut encore plus d'un demi-siècle pour constater l'autre, c'est-à-dire l'absorption du calorique latent; car ce fut en 1763 que Black mit cette vérité fondamentale dans tout son jour, et qu'il en fit voir les importantes conséquences. Il est visible que la quantité de calorique latent que prend un corps pour se fondre est proportionnelle à la masse de ce corps qui entre en fusion, et nous verrons plus loin qu'à masse égale, des corps différents prennent des quantités de calorique latent très-différentes; ce qui suffit pour imprimer à chaque substance un caractère distinctif pareil à celui qui dérive de la densité ou des autres qualités primitives de la matière.

L'affinité chimique est cependant une cause qui peut faire

changer le point de fusion des corps, mais il ne paraît pas qu'elle puisse modifier en rien l'absorption du calorique latent; ainsi, la neige ou la glace pilée étant, par exemple, à la température de — 10° et en contact avec du sel ordinaire aussi à — 10°, la fusion s'opère par la combinaison de ces deux corps, et la température s'abaisse de plus en plus; ce qui est une preuve évidente de l'absorption du calorique latent. C'est là le principe de la formation des *mélanges frigorifiques*, dont nous nous occuperons plus tard. Dans les combinaisons de cette espèce, la limite du froid que l'on peut produire est déterminée par la température à laquelle les éléments de la combinaison cessent d'agir l'un sur l'autre. La neige et le sel, par exemple, n'ayant plus d'action sensible à 18 ou 20°, au-dessous de 0, il est impossible d'obtenir avec ces éléments un froid plus grand que — 18 ou — 20° puisqu'au delà de ce terme ils cessent de se combiner; et, pour approcher de cette limite autant qu'il est possible, il faut que le calorique latent soit exclusivement fourni par la portion des éléments qui entrent en combinaison.

Ce qui arrive dans les mélanges frigorifiques se reproduit avec quelques modifications dans plusieurs procédés des arts, comme dans l'extraction des métaux, dans la fabrication du verre, et aussi dans les nombreux essais que l'on peut faire au chalumeau, pour la détermination chimique ou minéralogique de diverses substances. On emploie alors des *fondants*, c'est-à-dire des corps qui ont la propriété d'accélérer la fusion des matières avec lesquelles ils sont en contact, à peu près comme le sel accélère la fusion de la glace ou de la neige. Le composé qui en résulte étant beaucoup plus fusible que n'est la substance à laquelle on ajoute le fondant, on peut en tirer parti plus facilement : tantôt on le destine à d'autres combinaisons chimiques, comme il arrive à la mine de fer, qui entre en fusion par le fondant et ensuite se désoxyde et se carbonise pour se transformer en fonte; tantôt on le travaille immédiatement, comme le verre; tantôt on observe les nuances de sa couleur pour juger par là des éléments chimiques qui le constituent.

Le tableau suivant contient les points de fusion de diverses substances : j'ai déterminé ceux de ces points qui sont supérieurs a la température du rouge naissant, soit au moyen de mon pyromètre à air précédemment décrit (**134**), soit au moyen d'une masse sphérique de platine, dont j'avais déterminé les capacités

croissantes pour la chaleur, jusqu'à la température de la fusion de l'or. (Voy. t. II, *Calorimétrie*.)

Tableau du point de fusion de diverses substances, en degrés du thermomètre centigrade.

Noms des substances.	Degrés centigr.	Noms des substances.	Degrés centigr.
Fer martelé anglais	1600	Alliage, 1 étain, 3 plomb	289
Fer doux français	1500	*Id.* 3 étain, 1 bismuth	200
Aciers, les moins fusibles	1400	*Id.* 2 étain, 1 bismuth	167,7
Aciers, les plus fusibles	1300	*Id.* 1 plomb, 1 bismuth	141,2
Fonte manganésée	1250	*Id.* 1 plomb, 4 étain, 5 bismuth	118,9
Fonte grise, 2ᵉ fusion	1200	Soufre	115
Fonte grise, très-fusible	1100	Iode	107
Fonte blanche, peu fusible	1100	2 plomb, 3 étain, 5 bismuth	100
Fonte blanche, très-fusible	1050	5 plomb, 3 étain, 8 bismuth	100
Or très-pur	1250	4 bismuth, 1 plomb, 1 étain	94
Or au titre des monnaies	1180	Sodium	90
Argent très-pur	1000	Potassium	58
Bronze	900	Phosphore	44,2
Antimoine	432	Acide stéarique	70
Zinc	423	Cire blanchie	68
Plomb	332	Cire non blanchie	62
Bismuth	270	Acide margarique	55 à 60
Etain	235	Stéarine	49 à 43
Alliage, 5 atomes d'étain, 1 de plomb	194	Spermaceti	49
Id. 4 étain, 1 plomb	189	Acide acetique	45
Id. 3 étain, 1 plomb	186	Suif	33,33
Id. 2 étain, 1 plomb	196	Glace	0,0
Id. 1 étain, 1 plomb	241	Huile de térébenthine	—10
		Mercure	—40,0

Quelques physiciens sont portés à croire que de très-fortes pressions peuvent avancer le point de fusion; cette hypothèse a été mise à l'épreuve par M. Thomson et par M. Bunsen. M. Thomson croit pouvoir conclure de ses expériences que le point de fusion de la glace est hâté de 0°,1 pour une augmentation de pression de 4 atmosphères, qu'ainsi elle fondrait à — 1° et à — 2° sous 40 et sous 80 atmosphères. M. Bunsen, en opérant sur le spermaceti et sur la paraffine, est parvenu au résultat suivant :

	Pression.	Point de fusion.		Pression.	Point de fusion.
Spermaceti	1 atmosph.	47°,7	Paraffine	1 atmosph.	46°,3
	96	49 ,7		85	48 ,9
	156	50 ,9		100	49 ,9

148. Solidification. — Quand les liquides passent à l'état solide, on observe en général deux conditions correspondantes à celles de la fusion : premièrement la solidification s'opère à une température fixe, qui est celle de la fusion; secondement, tout le calorique latent, qui a été absorbé pendant la fusion, est

reproduit et dégagé pendant la solidification. Il suffit d'un thermomètre ou d'un pyromètre pour démontrer la première de ces vérités; quant à la deuxième, nous ne pourrons indiquer comment on la constate par l'expérience que quand nous donnerons les moyens de mesurer les quantités de calorique latent (t. II, *Calorimétrie*). On sait cependant, et cette observation a été faite en 1724 par Fahrenheit, on sait que, dans certaines circonstances, l'eau pure peut être amenée jusqu'à 10 ou 12° au-dessous de zéro, sans se congéler; c'est une sorte d'exception qui se présente dans quelques autres liquides. Ce phénomène, qui a lieu quelquefois à l'air libre, se manifeste plus sûrement quand la surface du liquide ne supporte plus qu'une faible pression produite par de l'air ou de la vapeur : aussi, pour l'observer, il convient d'enfermer le liquide dans des tubes que l'on scelle après y avoir fait le vide, ou de le placer sous le récipient de la machine pneumatique, et ensuite de refroidir graduellement, en évitant autant qu'il est possible, toute espèce d'agitation. Alors, après un certain degré de refroidissement, il suffit d'imprimer au liquide quelque secousse légère, ou de jeter dans sa masse quelques fragments d'un corps solide quelconque, pour déterminer à l'instant une solidification plus ou moins complète. En même temps, le thermomètre, qui indiquait l'abaissement de température, s'élève subitement et remonte toujours à peu près au terme naturel du changement d'état du corps. C'est ce qui a été bien constaté par M. Despretz, comme on le voit dans le tableau de la page 251 : l'avant-dernière colonne indique l'instant où la congélation a commencé, et la dernière colonne, le point où le thermomètre a remonté, qui est pris ici pour le vrai point de congélation. La rapidité de la solidification qui a eu lieu dans ces circonstances et l'ascension du thermomètre sont deux phénomènes faciles à expliquer : le calorique latent des premières parties qui se congèlent se porte sur les parties voisines qui sont encore liquides, il les réchauffe, mais ne les réchauffe pas assez pour les empêcher de se congeler à leur tour; de là le double effet de la prompte solidification et du réchauffement. Les dissolutions de sulfate de soude présentent des phénomènes analogues : ces dissolutions saturées à chaud laissent peu à peu déposer le sel de soude, lorsqu'elles se refroidissent à l'air libre; mais, si on les enferme dans des tubes effilés que l'on scelle à la lampe, après les avoir purgés d'air par l'ébullition, le refroi-

dissement ne donne plus de précipité, et dès que l'on brise la pointe effilée pour laisser entrer l'air, il y a précipité presque subit et élévation de la température.

Hors ces cas exceptionnels, quand le retour à l'état solide se fait au degré naturel de la fusion, il se fait toujours lentement et sans aucune élévation de température. Par exemple, quand l'eau gèle à 0, la congélation commence en général sur plusieurs points à la fois, et, sur tous ces points, les premières molécules qui se gèlent donnent leur calorique latent aux molécules voisines, qui sont par là maintenues à l'état liquide pendant quelques instants de plus. C'est pourquoi l'on aperçoit d'abord des lames minces de glace, ou des aiguilles très-fines, ou des filaments qui se croisent de mille manières dans la masse du liquide. A une certaine distance de ces premiers filaments, il s'en forme d'autres, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la chaleur latente se soit peu à peu dissipée, et que le froid ait pu saisir successivement toutes les molécules liquides pour les réunir en une seule masse solide. Sans le calorique latent, la solidification des corps se ferait en un instant. Ainsi, la rapidité de la solidification dépend de l'abondance de la chaleur qui se dégage, et de la facilité avec laquelle elle peut se dissiper.

Une même substance liquide peut prendre, en se solidifiant, des aspects et des propriétés très-différents. Quand le phénomène se produit lentement et sans trouble, il arrive ordinairement que la substance se cristallise ou qu'elle prend la plus grande densité dont elle soit susceptible. Au contraire, quand le refroidissement est prompt, et quand la masse liquide est agitée de quelque manière, les molécules n'ont pas le temps de se grouper et de s'arranger; elles se précipitent brusquement, et forment un solide dont toutes les parties intérieures sont dans un état plus ou moins forcé. Donnons quelques exemples de ces deux modes de solidification.

Refroidissement lent.—Quand l'eau gèle lentement, exposée à l'air en couches minces, par une température peu inférieure à zéro, on aperçoit des traces manifestes de cristallisation; des aiguilles entrelacées et des plaques plus ou moins larges, composant des sortes de dessin, des imitations de plantes ou de feuilles indéfiniment variées. Ce phénomène curieux se produit en hiver, sur les carreaux des fenêtres, et sur le sol humide où se trouvent quelques flaques d'eau de peu d'épaisseur. On l'observe encore

sur de grands bassins, quand la surface des eaux n'est pas agitée par le vent; alors, en soulevant la glace avec précaution, il n'est pas rare de trouver sur sa face inférieure une multitude de lames isolées, très-minces, mais longues, larges et pénétrant dans l'eau à une assez grande profondeur. Ce réseau délicat prouve bien, que chaque lame qui se solidifie, reste pendant quelque temps, comme enveloppée par les couches liquides qui ont reçu sa chaleur latente.

Le soufre fondu dans un grand creuset de terre et refroidi lentement présente un phénomène analogue : si l'on brise la croûte superficielle aussitôt qu'elle a acquis 1 ou 2 millimètres d'épaisseur, pour décanter le liquide intérieur, on voit en effet que cette portion encore liquide était pénétrée et comme sillonnée par un nombre infini d'aiguilles ou plutôt de longues pyramides à faces planes et symétriques. Le bismuth a un autre mode de cristallisation non moins curieux qui se manifeste par une expérience analogue. Après avoir fait fondre ce métal dans un creuset, on l'agite avec un peu d'azotate de potasse pour le purifier, ensuite on le verse dans un têt de terre, un peu chauffé d'avance; puis, la surface étant prise et un peu ferme on la brise pour décanter, et l'on aperçoit que tout ce qui n'était plus liquide avait revêtu les formes cristallines les plus vives et les plus brillantes.

L'étain a aussi une grande tendance à cristalliser : la lame mince de ce métal qui recouvre le fer dans la feuille de *fer-blanc*, s'est solidifiée progressivement en commençant par la surface; aussi, lorsqu'on le lave avec un acide faible, pour enlever la couche superficielle, on met à nu les couches un peu plus profondes et mieux cristallisées, qui constituent le *moiré métallique*.

Ces exemples suffisent pour faire comprendre que dans toute solidification lente, il y a un groupement moléculaire soumis à des formes géométriques et à des lois régulières. Les cristaux qui existent à un moment donné, peuvent être cachés et comme ensevelis dans le liquide qui les touche et qui se consolide à son tour; mais la cohésion n'étant pas égale dans tous les sens, il est souvent possible de les dégager au moins en partie, et de faire ressortir quelques-unes de leurs faces. C'est ainsi qu'en brisant la masse on met à découvert des angles solides, des arêtes vives, des joints naturels; c'est ainsi qu'en exerçant des

actions chimiques convenables, plus ou moins ralenties par l'inégale cohésion de la substance solidifiée, on parvient quelquefois à retrouver les linéaments de sa cristallisation primitive.

Refroidissement brusque. — Le verre en fusion pâteuse que l'on fait tomber goutte à goutte dans l'eau froide donne ce qu'on appelle les *larmes bataviques*, petites masses allongées en forme de poires qui jouissent de la singulière propriété de se réduire en poudre quand on brise seulement le petit filet qui en forme la queue. Il se fait alors une sorte d'explosion qui lancerait au loin ces fines poussières, si pour faire cette expérience on n'avait pas l'attention de mettre le corps de la larme batavique dans une large éprouvette, ou de l'envelopper d'un linge. C'est le brusque refroidissement dans l'eau qui a augmenté à ce point la fragilité du verre : l'enveloppe extérieure en se solidifiant sur le noyau encore liquide l'a enfermé dans un espace trop grand; pour remplir cet espace les molécules du noyau, en se refroidissant à leur tour, ont dû se mettre en tension au lieu de se contracter; et, dès qu'on vient à briser un point de l'enveloppe qu'elles tirent elles-mêmes de dehors en dedans, tout l'édifice s'écroule et tombe en poussière.

L'acier, sans être en fusion, mais chauffé seulement jusqu'au rouge orangé et refroidi de même par le contact d'un liquide, prend des propriétés analogues : il devient en même temps beaucoup plus dur et beaucoup plus cassant; c'est ce refroidissement brusque qui constitue la *trempe;* elle a ses degrés, suivant le degré de chaleur qu'avait l'acier quand il a été trempé dans l'eau. Lorsqu'on brise un barreau d'acier, qui, étant inégalement chaud dans sa longueur, a pris dans l'eau divers degrés de trempe, on distingue dans chaque section un *grain* ou un aspect différent. Ainsi, dans l'intérieur même d'un corps solide, les molécules ont assez de liberté pour se déplacer et s'arranger avec plus ou moins de précipitation suivant que les mouvements de la chaleur sont plus ou moins rapides.

La fonte prend aussi des qualités diverses par le refroidissement, surtout à l'instant de la solidification; cette propriété est mise à profit pour donner aux pièces que l'on coule une dureté plus grande, aux points où elles doivent résister à un frottement plus répété. Tous les métaux ne se comportent pas comme la fonte et l'acier, tous les composés salins ne se comportent

pas comme le verre, parce que la dureté et la fragilité ne sont pas de nature à varier dans tous les corps entre des limites aussi étendues. Cependant ces effets du refroidissement lent ou rapide font assez comprendre combien il est difficile que des corps solides soient véritablement homogènes et identiques à eux-mêmes dans les différents points de leur masse : s'ils sont cristallisés, les intervalles moléculaires varient de forme et de grandeur; s'ils sont amorphes, l'inégalité du refroidissement a placé les molécules dans un état forcé, qui détermine des tensions et des densités inégales. Quand les masses qui se refroidissent ont des dimensions un peu considérables, les parties centrales, solidifiées plus lentement, affectent presque toujours la forme cristalline; c'est ainsi que le verre se dévitrifie et donne des cristaux opaques au milieu des grands creusets des verreries qu'on laisse refroidir; c'est ainsi que dans les grandes coulées de laves, on trouve à diverses profondeurs des cristaux volumineux de composition et de structure différentes, leurs éléments constitutifs s'étant dégagés de l'ensemble chimique pour former des combinaisons nouvelles.

Changement de volume. — La solidification est en général accompagnée d'un changement de volume, même quand l'état chimique du corps n'éprouve aucune altération. Tout le monde sait que la glace est moins dense que l'eau, puisqu'elle flotte à sa surface; il arrive donc qu'au moment de la congélation les molécules d'eau s'écartent au lieu de se rapprocher pour constituer l'état solide. Huyghens a montré le premier, vers 1670, que cette augmentation de volume s'opère avec une grande puissance; car il fit éclater un canon de pistolet rempli d'eau et exposé à la gelée; c'est une expérience que l'on peut faire dans les cours publics : je prends pour cela des tubes de fer très-épais, de 1 mètre de longueur, de 3 centimètres de diamètre intérieur, fermés à vis aux deux bouts; après les avoir remplis d'eau, on les dispose dans une caisse de bois peu profonde, on les couvre d'un mélange réfrigérant de sel et de glace pilée; bientôt l'explosion se fait entendre, les tubes qui résisteraient à plusieurs centaines d'atmosphères sont déchirés dans leur longueur, on peut même faire sortir les cylindres de glace et montrer que l'eau n'a été qu'en partie congelée pour produire une si forte pression.

Si la glace était plus dense que l'eau et coulait à fond, il y a

bien des fleuves et peut-être bien des mers qui ne seraient autre chose que d'immenses glaciers.

La plupart des corps ne possèdent pas cette propriété exceptionnelle de l'eau, à l'état solide ils sont en général plus denses que le liquide de même température qui vient de les former.

Cependant le bismuth brise les tubes de verre dans lesquels il se solidifie ; et M. Ermann a observé un phénomène analogue dans l'alliage de 4 parties de bismuth, 1 de plomb et 1 d'étain : cet alliage singulier se dilate en se congelant, et il a un maximum de densité à l'état solide, vers 44°.

On doit à M. Rudberg des observations très-intéressantes sur la solidification de divers alliages métalliques de plomb et d'étain, d'étain et de bismuth, d'étain et de zinc, de zinc et de bismuth (*Ann. de Chym. et de Phys.*, t. XLVIII, p. 353). Par exemple, lorsque l'alliage binaire de plomb et d'étain est formé de 1 atome de plomb et de 3 atomes d'étain, il se solidifie à environ 187° ; mais, s'il est formé en d'autres proportions, il présente deux points de solidification : l'un *fixe*, à 187°, l'autre *mobile*, d'autant plus élevé au-dessus de 187° qu'il y a un plus grand excès de plomb ou d'étain au-dessus de la proportion précitée de 1 atome de plomb pour 3 d'étain. Il en résulte évidemment qu'il se forme alors deux alliages différents, qui restent mélangés jusqu'à ce que le refroidissement en opère la séparation. Les autres alliages métalliques présentent des phénomènes analogues.

Les dissolutions aqueuses, acides, ou alcooliques présentent à cet égard des phénomènes variables. Dans la congélation de l'eau de mer et des dissolutions salines très-étendues, il paraît que l'eau seule passe à l'état solide ; au contraire, dans la congélation du vin il se forme d'abord des dépôts plus ou moins abondants de bitartrate de potasse, de matière colorante et de matière azotée, puis vers —6°, —8°, ou — 10°, suivant la richesse alcoolique, il y a congélation partielle ou totale ; dans tous les cas la glace contient de l'alcool, qui n'est pas seulement interposé mais combiné. M. de Vergnette-Lamotte admet que cette glace est un composé alcoolique en proportions définies, fusible vers —6° ; M. Boussingault n'adopte pas cette opinion, cependant les expériences laissent encore des doutes puisqu'un mélange contenant 15 pour 100 d'alcool fut porté à 17 pour 100 quand on en eut séparé les lames de glace composant environ le quart du

volume total. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXV, p. 353 et 363.)

Allotropie.— Le soufre, le sélénium et le phosphore, trois des corps simples non métalliques qui n'affectent pas l'état gazeux, présentent, sous l'influence de la chaleur, des phénomènes extraordinaires tout à fait dignes d'intérêt : ils semblent changer d'aspect, de caractères physiques et même de propriétés chimiques ; c'est cette transformation que l'on appelle *allotropie*, comme pour indiquer que leurs molécules sont alors tournées ou groupées autrement.

Le soufre un peu au-dessus de son point de fusion est liquide comme de l'eau, en le chauffant davantage sa couleur jaune clair tourne au rouge, se fonce de plus en plus, sa substance devient visqueuse, pâteuse, coulant à peine, comme si elle tendait vers un nouvel état solide. Lorsqu'on verse dans l'eau froide en filet mince cette matière qui ressemble à de la mélasse, elle se fige un peu, et l'on retire de l'eau une masse filamenteuse, brun rougeâtre, assez tenace et élastique comme du caoutchouc. C'est ce que l'on appelle du *soufre mou*, il est alors dans un état amorphe. Cet état se conserve quelquefois durant des mois entiers, cependant l'aspect change peu à peu, la couleur jaune commence à reparaître, la masse devient moins élastique, puis cassante ; enfin elle reprend toutes les apparences et toutes les propriétés du soufre ordinaire.

Le sélénium porté à la température d'environ 220°, et lentement refroidi à l'air, devient visqueux, et prend une sorte d'état solide, amorphe, à 50°, sans avoir perdu sa chaleur latente (M. Hittorff, *Ann. de Poggendorf*, t. LXXXIV) ; mais si on le maintient pendant quelques heures, dans un bain d'huile, à environ 100°, ou un peu moins longtemps à environ 150°, il laisse dégager sa chaleur latente, et s'élève rapidement à une température de 40° ou 50° plus haute que celle du bain. Dans son état cristallisé son point de fusion paraît être à environ 217°.

Le phosphore maintenu pendant huit ou dix jours à une température d'environ 240 à 250°, à l'abri de tout contact de l'air, et de tout corps exerçant sur lui quelque action chimique, se transforme en une poudre rouge carmin, ou même en une masse cohérente ayant l'aspect de l'hématite (Schrotter, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1848 et 1850). C'est du phosphore amorphe, sa dureté est comprise entre celle du

spath calcaire et du spath fluor, et sa densité un peu supérieure à celle du phosphore ordinaire. Dans cet état il est insoluble dans l'éther, l'alcool, l'huile de naphte, le chlorure de phosphore; non-seulement il est inaltérable à l'air aux températures ordinaires, mais il ne prend feu qu'à la température de 260°, qui est celle où il commence à repasser à l'état ordinaire, lorsqu'on le chauffe dans un gaz inerte.

CHAPITRE II.

Des Vapeurs dans le vide.

149. **Les vapeurs se forment lentement dans l'air et instantanément dans le vide.** — Lorsqu'un liquide est exposé au contact de l'air, il arrive ordinairement qu'il diminue peu à peu de volume, et qu'après un temps plus ou moins long il disparaît tout à fait. Ainsi, l'eau qui couvre la terre après les pluies ne résiste pas au souffle d'un vent sec ou à l'action prolongée du soleil, elle se dissipe en quelques jours, et ce n'est pas seulement parce qu'elle s'infiltre dans le sol, mais aussi parce qu'elle s'exhale dans les airs. Au reste, on en voit la preuve dans ce qui arrive à un vase plein d'eau, exposé à l'air libre ou même dans un appartement : l'eau décroît d'instant en instant, et enfin il ne reste au fond du vase que les corps étrangers qu'elle tenait en dissolution. Le même phénomène se produit avec une rapidité encore plus grande lorsqu'on fait bouillir un liquide par l'action du feu : il se réduit peu à peu, et finit par disparaître. De ces diverses observations l'on peut conclure que les liquides changent d'état, qu'ils deviennent invisibles et prennent une force expansive comme les gaz; c'est ce qu'on exprime en disant qu'ils se *vaporisent* ou se réduisent en *vapeurs*. Les corps sont d'autant plus *volatils* qu'ils se vaporisent ou qu'ils se volatilisent plus promptement et à des températures moins élevées.

On peut remarquer aussi que, dans certains cas, ce n'est pas le liquide tout entier qui passe à l'état de vapeur; cela arrive lorsqu'il est un mélange de plusieurs corps différents qui se peuvent séparer par l'*évaporation;* alors, les parties plus volatiles s'exhalent en plus grande abondance, et ce qui reste n'est plus composé des mêmes éléments, ou du moins il n'en est plus composé dans les mêmes proportions.

Pendant longtemps on a supposé que les vapeurs ne pouvaient ni se former ni subsister par elles-mêmes, mais qu'elles prenaient naissance à la surface des liquides par l'action dissolvante de

l'air, et que cette même cause était encore nécessaire pour les maintenir suspendues dans l'atmosphère. Pour montrer la fausseté de cette opinion, et en même temps pour étudier les propriétés remarquables des vapeurs, le moyen le plus simple consiste à leur offrir un espace vide d'air et de gaz, dans lequel elles puissent se développer librement par elles-mêmes. Le vide barométrique est éminemment propre à ce genre d'expériences, non-seulement parce qu'il est aussi parfait qu'il soit possible, mais aussi parce que la colonne de mercure étant mobile, elle peut indiquer, par sa dépression, l'énergie de la force expansive qui s'exerce sur son sommet.

Supposons donc que, dans une large cuvette vv' (Fig. 3, Pl. 10), on dispose deux baromètres b et b' qui donnent très-exactement la pression de l'atmosphère, et qu'ensuite, au moyen d'une pipette recourbée, on fasse passer une petite quantité d'eau dans le tube du baromètre b'; l'eau s'élève en vertu de sa légèreté spécifique, elle arrive bientôt dans le vide de Torricelli, et, à l'instant, on voit le sommet de la colonne qui descend de plusieurs millimètres. Ce n'est pas le poids de la petite colonne d'eau supérieure qui a pu déprimer le mercure, ce n'est pas non plus l'air qu'elle aurait pu contenir et qui se serait dégagé, car nous la supposons parfaitement purgée d'air. Il faut donc que la substance propre de l'eau se soit vaporisée dans le vide, et que sa vapeur ait une propriété pareille à celle que nous avons appelée la *force expansive*, la *force élastique* ou la *tension des gaz*, car elle agit comme ferait une petite quantité d'air que l'on aurait fait passer au-dessus du mercure.

La *mesure de cette force élastique* est donnée par la *dépression*, c'est-à-dire par l'abaissement du sommet t au-dessous du sommet c, ou en général par la différence de hauteur entre le vrai baromètre b et le baromètre à vapeur b'. En effet, si le sommet t est déprimé, par exemple, de quinze millimètres au-dessous du sommet c, c'est qu'il s'est développé dans le vide, au-dessus de t, une force élastique qui fait équilibre à cette colonne de mercure de quinze millimètres.

Un troisième baromètre b'', que l'on mettrait à côté des deux premiers et dans lequel on ferait passer un autre liquide, de l'éther sulfurique par exemple, éprouverait aussi une dépression instantanée, et une dépression beaucoup plus grande que celle du baromètre b', car, en faisant l'expérience à la température

ordinaire, le sommet tomberait à peu près à la moitié de la hauteur du baromètre *b*. D'où il résulte que, dans ces circonstances, la force élastique de la vapeur d'éther sulfurique est à peu près une demi-pression atmosphérique.

L'appareil représenté (Fig. 7, Pl. 10) est destiné à montrer les diverses forces élastiques des vapeurs différentes, et à en donner la mesure au même instant. Il se compose d'une cuvette rectangulaire de fonte dans laquelle plongent sept ou huit tubes barométriques contenant des substances différentes; chaque tube a son échelle, dont le 0 est à l'extrémité inférieure des deux pointes d'acier *a*, *a'* : pour amener le niveau du mercure de la cuvette à l'affleurement de ces pointes, il suffit de tourner la vis *v* qui fait monter ou descendre le flotteur *f*; les vis calantes du pied de l'appareil servent à rendre horizontale la ligne des pointes. Alors, il suffit d'estimer la dépression de chaque tube par rapport à celui du milieu, qui est un baromètre ordinaire. Les substances que l'on soumet ainsi à l'expérience sont l'alcool, les éthers, les huiles essentielles, le camphre, le musc, etc.

150. Du maximum de tension des vapeurs. — Il est évident que la force expansive des vapeurs s'exerce dans tous les sens, comme la force expansive des gaz; il est évident aussi qu'elle s'exerce indéfiniment, c'est-à-dire qu'une quantité de vapeur, quelque petite qu'elle soit, se répand de toutes parts dans un espace vide, quelque grand qu'il puisse être, et qu'elle va s'arrêter aux parois qui limitent cet espace en y exerçant une pression plus ou moins forte. Ainsi, la moindre parcelle d'eau devient capable, en se vaporisant, de prendre un volume de plusieurs milliers de mètres cubes, comme ferait la moindre parcelle d'air en se répandant dans cet espace. Mais, si les vapeurs ont une force expansive indéfinie, par laquelle elles peuvent prendre des volumes indéfiniment grands, elles n'ont pas une force élastique indéfiniment croissante, par laquelle elles puissent résister aux pressions qu'on exerce sur elles, et se réduire à prendre des volumes de plus en plus petits : nous allons voir en effet que, de la vapeur étant donnée, si on essaye de la comprimer pour augmenter sa force élastique, on arrive à un point où cette vapeur se *condense* et repasse à l'état liquide plutôt que de prendre une force élastique plus grande; c'est cette *limite de résistance à être liquéfiée* que l'on appelle la *tension maximum de la vapeur*. Cette vérité fondamentale peut être démontrée

facilement au moyen du *baromètre à longue cuvette*, qui est représenté (Fig. 1, Pl. 10) : son tube *t* est très-long et sa cuvette *cc′* a plus d'un mètre de profondeur. Après avoir fait bouillir, dans toute sa longueur, le tube plein de mercure, on achève de le remplir avec une colonne d'éther de deux ou trois centimètres d'épaisseur, et ensuite on le retourne verticalement pour le plonger dans la cuvette. L'éther gagne la partie supérieure du tube, une partie reste à l'état liquide, et l'autre se vaporise dans le vide de manière à produire une dépression considérable. La colonne *ns* aura, par exemple, 400 millimètres de hauteur, au lieu de 760 qu'elle prendrait s'il n'y avait pas de vapeur. Cela fait, on enfonce le tube dans la cuvette, pour essayer de réduire à un moindre volume la vapeur qui s'est formée, et l'on observe alors que la colonne de mercure *sn* conserve la même hauteur, ce qui prouve que la force élastique de la vapeur reste la même; au lieu de se comprimer comme ferait de l'air elle se *condense*, c'est-à-dire qu'elle reprend l'état liquide, elle a donc le maximum de force élastique qu'elle puisse prendre à cette température. Il en est ainsi de tous les liquides : placés dans le vide, ils se vaporisent très-rapidement, jusqu'à ce que la vapeur ait pris son maximum; on dit alors que l'espace est *saturé* de vapeurs; mais s'il n'y avait pas assez de liquide pour saturer l'espace, tout le liquide disparaîtrait et la vapeur aurait une tension moindre que le maximum. C'est ce que l'on peut démontrer par l'expérience suivante : *ab* (Fig. 1, Pl. 11) est un baromètre ordinaire, *cd* est un tube qui plonge dans la même cuvette, et qui se termine en haut, soit par un réservoir de métal *r*, d'environ 1 litre, soit par un ballon de verre, portant en haut une tubulure pour faire le vide. Quand le vide est fait, aussi complétement que possible, la différence des niveaux supérieurs indique l'élasticité de l'air restant; alors avec la pipette graduée (Fig. 2), on aspire une petite colonne d'éther d'environ 1 centigramme que l'on va faire passer dans le tube *cd*; l'éther gagne visiblement le haut du tube, comme on le voit par l'ébullition qui en résulte, et par la dépression qui se produit; mais l'on n'aperçoit pas trace de liquide, tout s'est vaporisé. Cependant la dépression barométrique fait voir que la tension de la vapeur est bien loin du maximum, par conséquent, que l'espace est loin d'être saturé. Si le réservoir *r* peut contenir, par exemple, 1 gramme de vapeur, il faudrait répéter 100 fois l'expérience avant qu'on pût

apercevoir du liquide dans le tube; la tension de la vapeur toujours croissante atteindrait à la fin son maximum, l'espace serait alors saturé, et tout l'éther que l'on introduirait ensuite resterait liquide et n'augmenterait ni la quantité de vapeur ni la dépression.

151. Équilibre de tension dans un espace inégalement chaud. — Il est facile de reconnaître que la température a une grande influence sur la tension maximum des vapeurs, car, en faisant les expériences précédentes à différents degrés de chaleur, la colonne barométrique éprouve des dépressions très-inégales : par exemple avec l'éther sulfurique la dépression est à peu près de 180 millimètres à 0 de température, tandis qu'elle est de 630 à la température de 30°. Les phénomènes qui se produisent sous nos yeux nous fournissent d'ailleurs des preuves nombreuses de cette vérité : la vapeur d'eau n'a qu'une faible tension lorsqu'elle se forme à la surface des lacs ou à la surface de la mer; elle a une tension plus forte lorsqu'elle se forme par ébullition, puisqu'elle supporte alors la pression de l'atmosphère; enfin, à de hautes températures, cette tension devient si puissante qu'elle peut non-seulement lancer des projectiles du plus gros calibre, mais encore lancer au loin des machines entières et des masses énormes du poids de plusieurs quintaux : les explosions des chaudières à vapeur en offrent de trop nombreux et de trop terribles exemples.

Le petit appareil connu sous le nom de *bouillant de Franklin* (Fig. 18, Pl. 10) est très-propre à montrer que la tension de la vapeur d'éther augmente avec la température et diminue avec elle. Après avoir rempli d'éther la boule *a* et une partie du tube, on fait bouillir un instant le liquide dans le tube seulement pour purger d'air le reste du tube et la boule *b*, et alors on ferme l'ouverture *c* par laquelle se dégageait la vapeur. Le liquide se met alors de niveau dans les deux boules. Mais si l'on chauffe avec la main la boule *b*, la tension de la vapeur y devient plus forte, et tout le liquide est chassé dans la boule *a*; il y vient pareillement si au lieu de chauffer *b* on refroidit *a*.

D'après cela on peut se demander quelle serait la tension maximum de la vapeur dans un espace de forme quelconque, dont les diverses parties seraient à des températures différentes. En supposant que cet espace n'ait pas une grande hauteur verticale et que la vapeur soit, comme il arrive toujours, d'une faible densité, il faut, par les conditions d'équilibre des fluides

élastiques, que la tension soit la même dans tous les points où il y a de la vapeur, et comme, dans les points les plus froids, la tension maximum ne peut jamais être aussi grande que dans les points les plus chauds, il faut bien que, dans ces derniers, la tension cesse d'être au maximum, et qu'elle diminue jusqu'à devenir égale à la tension maximum des points les plus froids. Ainsi, dans un espace inégalement chaud, quand l'équilibre est établi, la tension de la vapeur est la même dans tous les points, et partout elle est égale à la tension maximum des parties de cet espace qui sont à la température la plus basse. Ce principe est rendu sensible au moyen de l'appareil *abc* (Fig. 12, Pl. 10) : la boule *a* étant à moitié pleine d'éther, on fait bouillir ce liquide, puis l'on retourne l'appareil rapidement dans une cuvette de mercure. On forme ainsi un baromètre dont la dépression est correspondante à la tension maximum de l'éther pour la température de l'air ambiant; or, si l'on refroidit la boule, en la plongeant dans de la glace pilée, le baromètre monte rapidement, et il s'arrête quand la dépression marque précisément la tension maximum de l'éther pour la température 0. La portion verticale du tube contient de la vapeur non refroidie, mais il en contient moins; pour se mettre en équilibre elle s'est précipitée et condensée dans la boule.

Cette vérité importante se montre encore au moyen de l'appareil qui est représenté (Fig. 17, Pl. 11) : *a* et *b* sont deux cornues soudées en *c*; la tubulure *d* porte un tube effilé que l'on a fermé à la lampe pendant l'ébullition de l'eau contenue dans l'appareil, cette ébullition ayant été prolongée assez longtemps pour chasser l'air. Après le refroidissement on fait passer tout le liquide dans la cornue *a*, que l'on plonge dans un bain maintenu, par exemple, à 50 ou 60°, tandis que la cornue *b* est plongée dans un bain à 0. Il se fait alors une véritable *distillation :* la vapeur se précipite de *a* en *b* par son excès de tension, et l'équilibre n'est établi que quand la totalité du liquide s'est réunie par condensation dans la cornue *b*, et que la force élastique est partout égale au maximum correspondant au lieu le plus froid. Le même phénomène se produirait encore si l'on avait laissé l'air dans l'appareil, mais il serait incomparablement plus lent.

152. Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau. — On mesure la tension de la vapeur d'eau, entre 0 et 100° au-des-

sous de 0 et au-dessus de 100°, jusqu'aux plus hautes températures. Chacune de ces déterminations exige un appareil différent.

Entre 0 et 100°. — L'appareil se compose de deux tubes barométriques placés très-près l'un de l'autre et plongeant dans la même cuvette (Fig. 13, Pl. 10). Le premier de ces tubes est un baromètre parfait; le deuxième est un baromètre à vapeur, c'est-à-dire un baromètre au-dessus duquel on a fait passer une colonne d'eau qui s'est en partie vaporisée dans le vide. Ces deux tubes sont plongés dans un vase de verre assez profond, au moyen de la tige de fer *f*; l'eau du vase est portée à diverses températures; sa température est aussi celle du baromètre parfait, celle du baromètre à vapeur, et celle de la vapeur elle-même qui se forme à son sommet : on l'observe avec un thermomètre convenablement disposé. Pour avoir la force élastique de cette vapeur correspondante à chaque degré, il suffit alors d'observer la dépression du baromètre à vapeur par rapport au baromètre parfait, et l'on y parvient aisément au moyen d'une échelle divisée de métal que l'on dispose entre les deux tubes. Ici les indications du cathétomètre seraient inexactes, à cause de la réfraction inégale que les rayons éprouvent en traversant l'enveloppe de verre. Cette dépression, réduite à 0, exprime la véritable tension de la vapeur. Tel est le procédé très-simple qui fut imaginé par Dalton de Manchester, en 1805, pour étudier les vapeurs, et qui lui servit à établir enfin la vraie théorie de leur formation et de leur élasticité.

Au-dessous de 0. — La glace elle-même se vaporise comme l'eau; et l'on voit Pl. 10, figures 8, 9, un appareil propre à déterminer la force élastique de la vapeur qu'elle donne à diverses températures au-dessous de 0. Cet appareil est analogue au précédent (Fig. 7, Pl. 10), seulement les deux baromètres à vapeur d'eau et d'alcool sont recourbés pour plonger par leur extrémité dans un mélange réfrigérant. Ainsi la chambre barométrique se compose d'une partie froide, dont la température est connue, et d'une autre partie qui est à la température ambiante; donc, d'après le principe précédent, la tension maximum de la vapeur est celle qui convient à la température du mélange réfrigérant. On voit même, par cette expérience, comment s'établit l'équilibre de tension; car on voit, par exemple, la petite colonne d'eau qui repose au sommet du mercure diminuer de plus en plus et disparaître complétement : elle disparaît parce

que la vapeur qu'elle donne ayant, au moment de sa formation, une force expansive plus grande que la vapeur qui est refroidie à l'extrémité du tube, elle n'a rien qui l'arrête, et va se condenser et se congeler à son tour dans l'espace froid; quelquefois même la rapidité de l'évaporation est si grande que la petite colonne d'eau se trouve congelée sur le mercure et ne disparaît alors qu'après un temps très-long. La dépression s'observe comme dans le cas précédent.

Au-dessus de 100°. — Pour montrer qu'au-dessus de 100° la tension de la vapeur d'eau est plus grande qu'une pression atmosphérique, on peut employer un simple tube recourbé (Fig. 2, Pl. 10) dont la courte branche est fermée en *s*; on le remplit de mercure jusqu'à la demi-hauteur de la branche ouverte, et on fait passer en *s* une petite colonne d'eau; ensuite on plonge l'appareil dans un bain d'huile dont la température est plus haute que 100° : bientôt la vapeur se forme, et sa force élastique est égale à une pression atmosphérique, plus la différence qui existe entre les deux niveaux du mercure dans la branche ouverte et la branche fermée. Mais, pour mesurer exactement les tensions qui s'élèvent à plusieurs atmosphères et les températures correspondantes, on rencontre de très-grandes difficultés. La science ne possédait sur ce point que des données vagues et incertaines, lorsque MM. Arago et Dulong furent chargés par l'Académie des sciences de déterminer les forces élastiques de la vapeur d'eau jusqu'aux plus hautes pressions dont on fasse usage dans les applications industrielles. Ce grand travail a été terminé en 1830. Avant d'en rapporter les résultats nous allons donner une idée des appareils qui ont servi à ces importantes déterminations.

Production de la vapeur. — La vapeur est produite dans une forte chaudière en tôle *c* (Fig. 17, Pl. 10) contenant environ 80 litres. Dans sa portion cylindrique qui est la plus faible, elle a 13 millimètres d'épaisseur. La même figure représente le fourneau *f*, la grille *g*, et le tuyau *t* par lequel s'échappe la fumée.

Mesure des températures. — Deux canons de fusil *e* et *r*, scellés au couvercle, ouverts en haut, fermés en bas et pleins de mercure servent à indiquer les températures de l'eau et de la vapeur. Dans le mercure qu'ils contiennent sont établis en permanence des thermomètres dont les tiges, recourbées horizontalement au sortir des canons, sont maintenues à une température

constante au moyen d'un courant d'eau. Cette disposition se voit plus en grand dans la figure 16 (Pl. 10).

Mesure des tensions. — La vapeur formée au-dessus de l'eau, à une température connue, s'élève par le petit tube vertical *bb'*, pour venir exercer sa pression en *u*, au sommet de la colonne d'eau qui remplit le tube incliné *udh* et toute la partie supérieure du vase manométrique *vv'*. Cette pression se transmet sur la surface *ss'* du mercure, et enfin à l'air du manomètre *mm'*, qui est le même que nous avons décrit précédemment (Fig. 8, Pl. 5). Comme on connaît la pression correspondante à une position donnée du sommet de la colonne de mercure dans le manomètre, on en déduit la force élastique de la vapeur. Il y a seulement deux corrections à faire : l'une relative à la hauteur verticale de la colonne d'eau, depuis son sommet *u* jusqu'à sa base *ss'*; et l'autre relative à la hauteur variable du mercure dans le vase *vv'*. C'est pour faire ces corrections avec exactitude que l'on voit, sur la seconde platine du vase *vv'*, un petit tube de verre *nn'* communiquant en outre au tube *udh*, et dans lequel on peut observer le niveau du mercure au moyen du curseur qui parcourt la règle verticale *z*.

A mesure que la vapeur arrive en *u*, elle se condense et retombe dans la chaudière; mais il n'en peut résulter aucune erreur, car on a soin de maintenir le tube *udh* à une température constante dans sa longueur *ud* par un courant d'eau.

MM. Arago et Dulong ont ainsi déterminé directement les tensions de la vapeur d'eau jusqu'à *vingt-quatre* atmosphères.

Pour répéter ces expériences dans mes cours de la Faculté des sciences et du Conservatoire des Arts et Métiers, j'ai fait construire un appareil très-portatif qui pourrait supporter des pressions d'une centaine d'atmosphères. Il est représenté (Fig. 3, Pl. 11). *a* est le vase à vapeur contenant trois quarts de litre de liquide; il se termine inférieurenent par un tube ayant environ 1 centimètre de diamètre extérieur, destiné à transmettre la pression au manomètre. En *e*, il s'adapte par une garniture de filasse au tube recourbé *ji*, qui vient lui-même s'adapter de la même manière au vase manométrique *v*. Celui-ci porte en outre deux autres tubulures, l'une *k*, qui peut à volonté recevoir un manomètre à air libre ou se fermer par un bouchon; l'autre *m*, qui reçoit le manomètre à air comprimé, dont le tube descend jusqu'au fond du vase. Le manomètre à air libre s'emploie sur-

tout pour vérifier, au besoin, dans les deux ou trois premières atmosphères, les indications du manomètre à air comprimé. C'est ainsi que l'on mesure les pressions. Voici maintenant comment elles sont produites par la vapeur, et comment l'on détermine les températures correspondantes.

Le vase *a*, où se trouve le liquide à vaporiser, est soudé en *b* au fond d'un vase plus large *de*, contenant un bain d'huile que l'on verse chaude et dont la température est entretenue ou portée plus haut par les lampes *p* dont on règle l'action. Un agitateur mélange sans cesse le liquide, des thermomètres *h* en donne la température, qui est précisément celle du liquide contenu dans le vase *a* et celle de la vapeur qu'il produit. Une enveloppe non conductrice empêche le refroidissement et soutient elle-même le vase *de* qui repose sur un rebord *r* du fond. La vapeur, en se formant au sommet du vase *a*, presse le liquide qui est au-dessous, et cette pression, transmise par les tubes, vient s'exercer sur la surface du mercure, et fait monter le manomètre.

On avait essayé diverses formules pour exprimer la force élastique maximum de la vapeur d'eau en fonction de la température. MM. Arago et Dulong se sont arrêtés à la suivante :

$$f=(1+0{,}7153\,t)^5,$$

comme représentant avec une grande approximation les résultats de l'expérience.

f représente la tension exprimée en atmosphères;

t représente les températures supérieures à 100°, exprimées en prenant pour unité l'intervalle de 100°.

Ainsi pour connaître la force élastique correspondante à 136°, par exemple, il faudrait faire $t=0{,}36$.

Cette formule, indiquée d'abord par le docteur Young, a été généralement adoptée en Angleterre, mais il a fallu en modifier les coefficients d'après les divers résultats de l'expérience : ainsi, le docteur Young avait pris 7 pour exposant, Creighton 6, Southern 5,13; plus tard les tables de l'ouvrage de Tredgold avaient été calculées par la même formule avec d'autres modifications, savoir :

$$f=\left(\frac{75+t}{85}\right)^6$$

la température t étant comptée en degrés centigrades à partir de 0° et l'élasticité f étant exprimée en centimètres de mercure.

M. Roche, professeur aux écoles d'artillerie et de la marine, avait, en 1830, présenté à l'Académie des sciences la formule suivante :

$$f = 760.10^{\frac{mt}{11 + 0{,}03t}}$$

f, force élastique exprimée en millimètres de mercure ;

t, température en degrés centigrades à partir de 100° et par conséquent comptée positivement au-dessus de 100° et négativement au-dessous ;

m, coefficient dont la valeur déduite des expériences de MM. Arago et Dulong est 0,1644.

Bien que M. Roche ait été conduit à cette forme exponentielle par des idées théoriques qui semblent peu admissibles, il est vrai cependant qu'elle représente mieux qu'aucune autre l'ensemble des expériences, pourvu que l'on ait soin de la prendre sous sa forme la plus générale et de déterminer les trois constantes par trois forces élastiques observées et par les trois températures correspondantes.

Les quatre tableaux suivants contiennent les résultats de l'observation et du calcul :

Le 1er s'étend de — 20° jusqu'à 100° centigrades d'après l'observation ;

Le 2e, de 1 à 24 atmosphères d'après l'observation, et de 24 à 50 atmosphères d'après le calcul ;

Le 3e, de 100 à 1000 atmosphères d'après le calcul ;

Le 4e résulte des observations et des calculs de M. Regnault (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XI, p. 273). Il confirme d'une manière remarquable l'exactitude générale des nombres contenus dans le premier. M. Regnault, après avoir essayé les diverses formules d'interpolation qui ont été proposées, donne la préférence à la formule suivante :

$$\log. e = a + b\alpha^t + c\beta^t,$$

que M. Biot avait indiquée en 1833 et employée quelques années après (voy. *Connaissance des temps pour* 1839 et *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1841, t. XII, p. 150).

La force élastique e est donnée par son logarithme ; les températures t sont évaluées en degrés centigrades, et les cinq constantes a, b, c, α et β, se déterminent par cinq observations convenablement espacées, par exemple celles de 0°, 25°, 50°, 75°, et 100°.

Premier tableau. — *Forces élastiques de la vapeur d'eau, de — 20° à 100° centigrades.*

DEGRÉS du thermom. centigr.	TENSION de la vapeur en millimètres.	PRESSION sur un centim. carré en kilogr.	DEGRÉS du thermom. centigr.	TENSION de la vapeur en millimètres.	PRESSION sur un centim. carré en kilogr.
degr.	mm.	kil.	degr.	mm.	kil.
—20	1,333	0,0018	49	84,370	0,11662
—15	1,879	0,0026	50	88,743	0,12056
—10	2,631	0,0036	51	93,301	0,12676
— 5	3,660	0,0050	52	98,075	0,13325
0	5,059	0,0069	53	103,060	0,13999
1	5,393	0,0074	54	108,070	0,14710
2	5,748	0,0078	55	113,710	0,15449
3	6,123	0,0084	56	119,390	0,16220
4	6,523	0,0089	57	125,310	0,17035
5	6,947	0,0094	58	131,500	0,17866
6	7,396	0,0101	59	137,940	0,18736
7	7,871	0,0107	60	144,660	0,19653
8	8,375	0,0114	61	151,700	0,20610
9	8,909	0,0122	62	158,960	0,21586
10	9,475	0,0129	63	165,560	0,22639
11	10,074	0,0137	64	174,470	0,23758
12	10,707	0,0146	65	182,710	0,24823
13	11,378	0,0155	66	191,270	0,25986
14	12,087	0,0165	67	200,180	0,27196
15	12,837	0,0170	68	209,440	0,28154
16	13,630	0,0186	69	219,060	0,29761
17	14,468	0,0197	70	229,070	0,31121
18	15,353	0,0209	71	239,450	0,32532
19	16,288	0,0222	72	250,230	0,33996
20	17,314	0,0235	73	261,430	0,35518
21	18,317	0,0250	74	273,030	0,37094
22	19,447	0,0265	75	285,070	0,39632
23	20,577	0,0281	76	297,570	0,40128
24	21,815	0,0297	77	310,490	0,42184
25	23,090	0,0314	78	323,890	0,44004
26	24,452	0,0334	79	337,760	0,45888
27	25,881	0,0353	80	352,080	0,47834
28	27,390	0,0374	81	367,000	0,49860
29	29,045	0,0396	82	382,380	0,51950
30	30,643	0,0418	83	398,280	0,54110
31	32,410	0,0440	84	414,730	0,56345
32	34,261	0,0465	85	431,710	0,58652
33	36,188	0,0492	86	449,260	0,61036
34	38,254	0,0520	87	467,380	0,63498
35	40,404	0,0549	88	486,000	0,66040
36	42,743	0,0581	89	505,380	0,68661
37	45,038	0,0612	90	525,28	0,71364
38	47,759	0,0646	91	547,80	0,74152
39	50,147	0,0681	92	566,95	0,77026
40	52,998	0,0720	93	588,74	0,79986
41	55,772	0,0758	94	611,18	0,83035
42	58,792	0,0799	95	634,27	0,86172
43	61,958	0,0418	96	658,05	0,89402
44	65,627	0,08916	97	682,59	0,92736
45	68,751	0,09340	98	707,63	0,96138
46	72,393	0,09835	99	733,46	0,99448
47	76,205	0,1035	100	760,00	1,03253
48	80,195	0,10900			

DEUXIÈME TABLEAU.

FORCES élastiques exprimées en atm. de 76 cent. de mercure.	TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogramm.	FORCES élastiques exprimées en atm. de 76 cent. de mercure.	TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogramm.
1	100	1,033	13	193,7	13,429
1 1/2	112,2	1,549	14	197,19	14,462
2	121,4	2,066	15	200,48	15,495
2 1/2	128,8	2,582	16	203,60	16,528
3	135,1	3,099	17	206,57	17,561
3 1/2	140,6	3,615	18	209,4	18,594
4	145,4	4,132	19	212,1	19,627
4 1/2	149,06	4,648	20	214,7	20,660
5	153,08	5,165	21	217,2	21,693
5 1/2	156,8	5,681	22	219,6	22,726
6	160,2	6,198	23	221,9	23,759
6 1/2	163,48	6,714	24	224,2	24,792
7	166,5	7,231	25	226,3	25,825
7 1/2	169,37	7,747	30	236,2	30,990
8	172,1	8,264	35	244,85	36,155
9	177,1	9,297	40	252,55	41,320
10	181,6	10,33	45	259,52	46,485
11	186,03	11,363	50	265,89	51,650
12	190,0	12,396			

TROISIÈME TABLEAU.

FORCES élastiques exprimées en atmosph.	TEMPÉRATURES correspondantes.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogramm.	FORCES élastiques exprimées en atmosph.	TEMPÉRATURES correspondantes.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogramm.
100	314,36	103,3	600	462,71	619,8
200	363,58	206,60	700	478,45	723,1
300	397,65	309,90	800	492,47	826,4
400	423,57	413,20	900	505,16	929,7
500	444,70	516,50	1000	516,76	1033,0

Il paraît bien probable que la formule qui a servi à calculer ces tableaux représente d'une manière assez approchée les tensions et les températures correspondantes jusqu'à 50 atmosphères, et peut-être jusqu'à 100. Mais les nombres du troisième tableau ne peuvent inspirer confiance ; ils attendent une confirmation expérimentale.

Quatrième tableau, *d'après M. Regnault*, *de* — 32° *à* + 100°.

TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	FORCE ÉLASTIQUE en millim. de mercure.	DIFFÉRENCES.	TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	FORCE ÉLASTIQUE en millim. de mercure.	DIFFÉRENCES.	TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	FORCE ÉLASTIQUE en millim. de mercure.	DIFFÉRENCES.
—32	0,31	0,03	12	10,46	0,71	56	123,24	6,04
31	0,34	0,03	13	11,16	0,75	57	129,25	6,25
30	0,36	0,03	14	11,91	0,79	58	135,51	6,51
29	0,40	0,03	15	12,70	0,84	59	142,02	6,78
28	0,43	0,04	16	13,54	0,89	60	148,79	7,05
27	0,47	0,04	17	14,42	0,94	61	155,84	7,33
26	0,51	0,04	18	15,36	0,99	62	163,17	7,62
25	0,55	0,05	19	16,35	1,05	63	170,79	7,92
24	0,60	0,05	20	17,39	1,10	64	178,74	8,23
23	0,65	0,06	21	18,50	1,16	65	186,95	8,55
22	0,71	0,06	22	19,66	1,23	66	195,50	8,88
21	0,77	0,07	23	20,89	1,30	67	204,38	9,22
20	0,84	0,07	24	22,18	1,37	68	213,60	9,57
19	0,92	0,08	25	23,55	1,44	69	223,17	9,93
18	1,00	0,09	26	24,99	1,52	70	233,09	10,30
17	1,08	0,10	27	26,51	1,60	71	243,39	10,68
16	1,18	0,10	28	28,10	1,68	72	254,07	11,07
15	1,28	0,11	29	29,78	1,77	73	265,15	11,48
14	1,40	0,12	30	31,55	1,86	74	276,62	11,89
13	1,52	0,13	31	33,41	1,95	75	288,52	12,32
12	1,66	0,15	32	35,36	2,05	76	300,84	12,76
11	1,80	0,16	33	37,41	2,15	77	313,60	13,21
10	1,96	0,17	34	39,57	2,26	78	326,81	13,68
9	2,14	0,19	35	41,83	2,37	79	340,49	14,16
8	2,33	0,21	36	44,20	2,49	80	354,64	14,64
7	2,53	0,23	37	46,69	2,61	81	369,29	15,15
6	2,76	0,25	38	49,30	2,74	82	384,44	15,67
5	3,00	0,27	39	52,04	2,87	83	400,10	16,20
4	3,27	0,28	40	54,91	3,00	84	416,30	16,74
3	3,53	0,33	41	57,91	3,15	85	433,04	17,30
2	3,88	0,35	42	61,06	3,29	86	450,34	17,88
1	4,22	0,38	43	64,35	3,44	87	468,22	18,47
0	4,60	0,34	44	67,79	3,60	88	486,69	19,07
+ 1	4,94	0,36	45	71,39	3,77	89	505,76	19,69
2	5,30	0,39	46	75,16	3,94	90	525,45	20,33
3	5,69	0,41	47	79,09	4,11	91	545,78	20,98
4	6,10	0,44	48	83,20	4,30	92	566,76	21,65
5	6,53	0,46	49	87,50	4,48	93	588,41	22,33
6	7,00	0,49	50	91,98	4,70	94	610,74	23,04
7	7,49	0,53	51	96,66	4,88	95	633,78	23,76
8	8,02	0,56	52	101,54	5,09	96	657,54	24,49
9	8,57	0,59	53	106,64	5,31	97	682,03	25,25
10	9,17	0,63	54	111,95	5,53	98	707,28	26,03
11	9,79	0,67	55	117,48	5,77	99	733,31	26,70
12	10,46		56	123,24		100	760,00	

155. Tension des vapeurs des divers liquides. — On voit, dans le tableau précédent, qu'au point d'ébullition la vapeur d'eau a une tension qui fait équilibre à une pression atmosphérique; cette propriété est tout à fait générale : la tension de la vapeur qui se forme par ébullition est toujours égale à la pression qui s'exerce sur la surface du liquide; car, si elle était moindre, la vapeur ne pourrait ni se former, ni subsister en bulles au milieu de la masse liquide, et, si elle était plus forte, elle se serait formée plus tôt, rien n'empêchant qu'elle se forme dès l'instant qu'elle peut vaincre la pression. A l'ébullition, les vapeurs de tous les liquides ayant des tensions égales, Dalton avait pensé qu'en s'écartant d'un même nombre de degrés au-dessus et au-dessous de ce point, les tensions ne cesseraient pas d'être encore égales entre elles. Ainsi, d'après cette *loi de Dalton*, et avec la table des tensions de la vapeur d'eau, il suffirait d'avoir le point d'ébullition d'un liquide ou la tension de sa vapeur à une température quelconque, pour déterminer sa tension à toutes les températures possibles. Par exemple, l'alcool ayant son point d'ébullition à 78°, la tension de sa vapeur à 113°, c'est-à-dire à 35° au-dessus de son point d'ébullition, serait la même que la tension de la vapeur d'eau à 135°, et par conséquent de 2280^{mm} ou 3 atmosphères, et à 0, c'est-à-dire à 78° au-dessous de son point d'ébullition, sa tension serait la même que celle de la vapeur d'eau à 100 — 78 ou à 22°, et par conséquent de $19^{mm},447$. Mais il résulte des observations de plusieurs physiciens que cette loi n'est pas absolument rigoureuse : à de grandes distances des points d'ébullition, elle commence à s'écarter sensiblement de la vérité, et, s'il est toujours commode de s'en servir lorsqu'on ne veut que des approximations, il serait nécessaire de l'abandonner lorsqu'on voudrait de l'exactitude. Il est donc à souhaiter que, du moins pour les liquides les plus communs, les physiciens dressent des tables de tension pareilles à la table des tensions de la vapeur d'eau.

Déjà M. Regnault vient de communiquer à l'Académie des sciences (*Comptes rendus*, 14, 21, 28 *août* 1854) les résultats qu'il a obtenus sur ce sujet; les nombres suivants sont extraits de ces trois publications.

TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES DES VAPEURS EN MILLIMÈTRES.				
	Essence de térébenthine.	Alcool.	Chloroforme.	Sulfure de carbone.	Éther.
— 20	»	3,3	»	»	69,2
— 10	»	6,5	»	79,0	113,2
0	2,1	12,7	»	127,3	182,3
10	2,3	24,1	130,4	199,3	236,6
20	4,3	44,0	190,2	298,2	434,8
30	7,0	78,4	276,1	434,6	637,0
40	11,2	134,1	364,0	617,5	913,6
50	17,2	220,3	524,3	852,7	1268,0
60	26,9	350,0	738,0	1162,6	1730,3
70	41,9	539,2	976,2	1549,0	2309,5
80	61,2	812,8	1367,8	2030,5	2947,2
90	91,0	1190,4	1811,5	2623,1	3899,0
100	134,9	1685,0	2354,6	3321,3	4920,4
110	187,3	2351,8	3020,4	4136,3	6249,0
120	257,0	3207,8	3818,0	5121,6	»
130	347,0	4331,2	4721,0	6260,6	»
140	462,3	5637,7	»	»	»
150	604,5	7257,8	»	»	»

TEMPÉRATURES.	Forces élastiques de la vapeur de benzine.	TEMPÉRATURES.	Forces élastiques de la vapeur de chlorure de carbone.	TEMPÉRATURES.	Forces élastiques de la vapeur de chlorure de carbone.
	mm		mm		mm
7°,22	40,4	8°,75	55,4	30°,64	147,3
9 ,98	46,8	13 ,32	68,7	33 ,78	168,0
12 ,11	54,4	18 ,84	88,3	36 ,53	187,3
16 ,05	62,7	22 ,81	105,8	42 ,35	236,0
18 ,59	71,0	26 ,44	123,7	48 ,43	296,2

Les tensions à basses températures ont été déterminées dans le vide, les tensions à températures élevées ont été obtenues par l'ébullition des liquides sous des pressions produites par des atmosphères artificielles. M. Regnault a constaté que ces deux méthodes s'accordent quand le liquide est parfaitement pur, mais qu'elles cessent de s'accorder quand le liquide contient des portions, même extrêmement petites, d'une autre substance volatile; on comprend, en effet, que l'intervention de la vapeur étrangère ne soit pas la même dans les deux cas. Le chloro-

forme n'est jamais pur, car, à la même température, les deux résultats n'ont jamais été d'accord ; dans le tableau précédent les trois premiers nombres seulement ont été obtenus par la première méthode.

M. Regnault a constaté de plus les faits suivants :

1° De l'essence de térébenthine ayant été soumise à l'ébullition pendant plusieurs heures, sous une pression de 7 à 8 atmosphères, s'est transformée à peu près complétement en une matière liquide qui bouillait au-dessus de 230° sous la pression ordinaire de l'atmosphère.

2° L'éther conservé longtemps dans un tube hermétiquement fermé a subi quelque altération moléculaire, sa vapeur a changé de tension.

3° Les forces moléculaires qui déterminent la solidification d'une substance n'exercent pas d'influence sensible sur la tension de sa vapeur dans le vide ; car, à l'état solide, l'eau, l'hydrocarbure de brôme et la benzine, ont des tensions qui se trouvent en continuité parfaite avec leurs tensions à l'état liquide.

4° S'il n'en est pas de même de l'acide acétique monohydraté, qui présente à cet égard des anomalies singulières, c'est sans doute parce qu'il n'est jamais parfaitement pur : ordinairement il retient un peu d'eau, et si on le distille sur l'acide phosphorique anhydre, il contient quelques traces d'acétone.

154. Densité de la vapeur d'eau. — Entre tous les moyens qui ont été employés pour obtenir la densité de la vapeur d'eau, celui de M. Gay-Lussac paraît le plus simple et le plus rigoureux ; il consiste à chercher directement le poids, le volume, la température et la tension d'une quantité de vapeur donnée. Pour cela, on se sert de l'appareil qui est représenté dans la figure 4 (Pl. 10) : c'est un fourneau *f* sur lequel repose une chaudière *c*, en fonte, dont le bord *b* a été travaillé de manière à former un plan qu'on ajuste avec un niveau dans la direction horizontale ; *g* est une cloche graduée, de trois ou quatre décimètres de longueur, plongeant dans le bain de mercure de la chaudière ; *m* est un manchon de verre dans lequel on verse un liquide qui enveloppe la cloche dans toute sa longueur, depuis le niveau extérieur du mercure, et qui la recouvre à son sommet ; *r* est une règle divisée qui se met verticalement au moyen de la traverse *t*, dont la face plane se pose exactement sur le bord

horizontal de la chaudière. La cloche est pleine de mercure bouilli, et en outre on y fait passer une petite ampoule de verre *a*, scellée par les deux bouts et presque entièrement remplie d'eau. On met des charbons sous la chaudière; le mercure, l'ampoule et l'eau du manchon s'échauffent graduellement, et divers thermomètres donnent à chaque instant leur température commune. A un certain instant, l'ampoule est crevée par l'effort de la dilatation de l'eau qu'elle contient; la vapeur se forme au-dessus de la cloche, le mercure est déprimé, et on pousse la température jusqu'à ce que l'eau soit complétement vaporisée, c'est une condition nécessaire. Alors on maintient les choses dans cet état pour accomplir toutes les observations.

1° L'eau étant toute vaporisée, on connaît le poids de la vapeur, car on a eu soin de peser l'ampoule vide, et de la peser ensuite après l'avoir remplie; la différence des deux pesées est le poids de l'eau, et par conséquent celui de la vapeur.

2° On observe le nombre des divisions de la cloche qu'occupe la vapeur : chacune de ces divisions ayant une capacité connue à la température 0, on trouvera facilement, par le coefficient de dilatation du verre, sa capacité pour la température où l'on opère, et, de la sorte, on aura le volume réel de la vapeur.

3° Les thermomètres indiquent la température du liquide du manchon et celle de l'eau vaporisée dans la cloche.

4° Enfin, on observe la tension de la vapeur au moyen de la règle *r*. D'abord, on la fait monter ou descendre de manière que sa pointe inférieure vienne affleurer la surface du mercure de la chaudière, et ensuite on fait marcher le *voyant v* jusqu'à ce que le rayon visuel rase le sommet de la colonne du mercure de la cloche. La longueur qui se trouve entre la pointe et le *voyant* est la hauteur de la colonne soulevée : on la réduit à 0, on la retranche de la hauteur actuelle du baromètre, pareillement réduite à 0, et la différence est la dépression de la colonne barométrique ou la force élastique de la vapeur. Si cette force approchait trop de la tension maximum, pour la température à laquelle on opère, il faudrait craindre que toute l'eau ne fût pas vaporisée, et chauffer davantage pour se mettre à l'abri de cette chance d'erreur.

Ayant ainsi le poids d'un volume donné de vapeur à une température et sous une pression connues, on en déduit aisément le poids d'un centimètre cube, ou le poids spécifique pour les con-

ditions de l'expérience, c'est-à-dire à une température t et sous une pression h. Admettant ensuite que les vapeurs sont soumises à la loi de Mariotte et qu'elles ont un coefficient de dilatation constant, on en déduit le poids spécifique de la vapeur à une autre température t' et sous une autre pression h'. En effet ϖ étant le poids spécifique trouvé par l'expérience pour la température t et la pression h, ϖ' celui qui correspond à la température t' et à la pression h', on a alors

$$\varpi' = \varpi \frac{h}{h'} \cdot \frac{1 + at}{1 + at'}.$$

ϖ et ϖ' étant exprimés en grammes, le volume correspondant à 1 gramme, et exprimé en centimètres cubes, sera

$$v' = \frac{1}{\varpi'} = \frac{1}{\varpi} \cdot \frac{h}{h'} \cdot \frac{1 + at'}{1 + at}.$$

De même que ϖ' représente le poids spécifique de la vapeur par rapport à l'eau, v' représente aussi le volume de la vapeur par rapport au volume de l'eau, puisqu'il représente en centimètres cubes le volume de 1 gramme de vapeur.

C'est par cette formule que M. Gay-Lussac a trouvé qu'à la température de 100° et sous la pression maximum de 1 atmosphère ou de 76^c, le volume de la vapeur d'eau est 1698 fois, ou en nombres ronds 1700 fois le volume de l'eau, celle-ci étant prise par conséquent au maximum de densité.

La densité théorique 0,622, que nous avons trouvée page 247, conduit au nombre 1692 qui diffère assez peu de 1698, pour que l'on puisse conclure que deux volumes d'hydrogène et un volume d'oxygène donnent en effet deux volumes de vapeur d'eau. Mais il faut prendre garde, comme nous l'avons déjà remarqué, que la densité relative de deux fluides élastiques n'est constante pour toute température et toute pression que dans le cas où la loi de Mariotte s'applique avec la même exactitude aux deux fluides, et qu'en même temps les coefficients de dilatation restent invariables, ou varient suivant la même loi. Il est donc présumable qu'en calculant les densités de la vapeur d'eau par les formules précédentes, comme nous l'avons fait pour les tableaux ci-après, nous sommes parvenu à des nombres qu'il ne faut prendre que comme densités théoriques; quand les densités

réelles auront été déterminées par l'expérience, on trouvera peut-être des écarts considérables, surtout dans les hautes pressions.

Il y a cependant un fait non douteux, c'est que la densité de la vapeur, prise au maximum de tension, va croissant rapidement à mesure que la température s'élève; il en résulte qu'à un certain degré de chaleur la vapeur doit avoir une densité qui approche beaucoup de la densité du liquide lui-même. Cette conséquence a été vérifiée et rendue frappante par une expérience curieuse de M. Cagniard de La Tour. Un tube de verre très-fort étant rempli d'eau à peu près au quart de sa capacité, puis purgé d'air, et ensuite scellé, on l'expose à une température graduellement croissante; alors, à un certain degré de chaleur, l'eau semble disparaître, le tube est comme vide : mais, en refroidissant un peu, le liquide reparaît presque subitement. On pourrait se faire une sorte de jeu de ces alternatives d'apparition et de disparition, si l'on ne devait pas, en les répétant, craindre de dangereuses explosions.

C'est à une température voisine de celle de la fusion du zinc que l'eau se vaporise complétement dans un espace à peu près quadruple de son volume à l'état liquide; en même temps, elle agit sur le verre, et lui ôte sa transparence en dissolvant sans doute quelques-uns de ses éléments. D'après cela, on peut présumer qu'à la température rouge, la densité de la vapeur d'eau à son maximum de tension est peu différente de la densité de l'eau liquide, et qu'alors elle a une force expansive de plusieurs centaines et peut-être de quelques milliers d'atmosphères.

M. Cagniard de La Tour n'a pas pu observer ces phénomènes sur l'eau distillée. L'action corrosive qu'elle exerce sur le verre, à ces températures d'environ 350°, en dépolit la surface si profondément que l'on ne peut plus distinguer l'instant où le liquide disparaît en vapeurs; mais en employant de l'eau qui tient en dissolution un peu de carbonate de soude, le verre conserve une transparence suffisante. Il est bon aussi de laisser un peu d'air sur la surface du liquide; on évite ainsi, au moins en partie, l'ébullition par soubresauts qui détermine presque toujours la rupture des tubes. Enfin M. Cagniard de La Tour est porté à croire que l'eau très-dilatée par la chaleur acquiert une compressibilité beaucoup plus grande et qu'elle commence en quelque sorte à participer aux propriétés des fluides élastiques.

PREMIER TABLEAU. — *Densité et volume de la vapeur d'eau, au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à* 0 : *de* — 20° *à* 100°.

TEMPÉRATURE.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.	TEMPÉRATURE.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.
deg.	mm.			deg.	mm.		
—20	1,333	0,00000154	650588	49	84,370	0,00007602	13154
15	1,879	212	470898	50	88,742	7970	12546
10	2,631	292	342084	51	93,301	8354	11971
5	3,660	498	251358	52	98,075	8753	11421
0	5,059	540	182323	53	103,060	9174	10901
+ 1	5,393	573	174495	54	108,270	9606	10410
2	5,748	609	164332	55	113,710	0,00010054	9946
3	6,123	646	154842	56	119,390	10525	9501
4	6,523	686	145886	57	125,310	11011	9082
5	6,947	727	137488	58	131,500	11523	8680
6	7,396	772	129587	59	137,940	12044	8303
7	7,871	818	122241	60	144,660	12599	7937
8	8,375	867	115305	61	151,700	13179	7594
9	8,909	919	108790	62	158,960	13760	7267
10	9,475	974	102670	63	166,560	14374	6957
11	10,074	0,00001032	99202	64	174,470	15010	6662
12	10,707	1092	91564	65	182,710	15668	6382
13	11,378	1157	86426	66	191,270	16356	6114
14	12,087	1224	81686	67	200,180	17060	5860
15	12,837	1299	77008	68	209,440	17797	5619
16	13,630	1372	72913	69	219,060	18566	5386
17	14,468	1451	68923	70	229,070	19355	5167
18	15,353	1534	65201	71	239,450	20174	4957
19	16,288	1622	61654	72	250,230	21013	4759
20	17,314	1718	58224	73	261,430	21889	4569
21	18,317	1811	55206	74	273,030	22794	4387
22	19,417	1914	52260	75	285,070	23789	4204
23	20,577	2021	49487	76	297,570	24702	4048
24	21,805	2133	46877	77	310,190	25699	3891
25	23,090	2252	44411	78	323,890	26739	3741
26	24,452	2376	42084	79	337,760	27789	3599
27	25,881	2507	39595	80	352,080	0,00028889	3462
28	27,390	2643	37838	81	367,000	30025	3331
29	29,045	2794	35796	82	382,380	31195	3206
30	30,643	2938	34041	83	398,260	32399	3087
31	32,410	3097	32291	84	414,730	33637	2973
32	34,261	3263	30650	85	431,710	34916	2864
33	36,188	3435	29112	86	449,260	36237	2760
34	38,254	3619	27636	87	467,380	37590	2660
35	40,404	3809	26253	88	486,090	38984	2565
36	42,743	4017	24897	89	505,380	40417	2474
37	45,038	4219	23704	90	525,280	41891	2387
38	47,579	0,00004442	22513	91	545,800	0,00043405	2304
39	50,147	4666	21429	92	566,950	44956	2224
40	52,998	4916	20343	93	588,740	46556	2148
41	55,772	5156	19396	94	611,180	48204	2075
42	58,792	5418	18469	95	634,270	49886	2005
43	61,958	5691	17572	96	658,050	51613	1938
44	65,627	6023	16805	97	682,590	53388	1873
45	68,751	6274	15938	98	707,630	55194	1812
46	72,393	6585	15185	99	733,460	57055	1751
47	76,205	6910	14472	100	760,000	58955	1696
48	80,195	7242	13809				

DEUXIÈME TABLEAU.— *Densité et volume de la vapeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à* 0 :

De 1 à 24 atmosphères d'après l'observation,
Et de 24 à 50 d'après la formule empirique.

TEMPÉRATURES.	FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	DENSITÉ.	VOLUME.	TEMPÉRATURES.	FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	DENSITÉ.	VOLUME.
100,	1	0,0005895	1696	193,7	13	0,006107	163,74
112,2	1 1/2	0,0008563	1167,8	197,2	14	0,006527	153,10
121,4	2	0,0011147	897,09	200,5	15	0,006944	144,00
128,8	2 1/2	0,0013673	731,39	203,6	16	0,007359	135,90
135,1	3	0,0016150	619,19	206,6	17	0,007769	128,71
140,6	3 1/2	0,0018589	537,96	209,4	18	0,008178	122,28
145,4	4	0,0020997	476,26	212,1	19	0,008583	116,51
149,1	4 1/2	0,0023410	427,18	214,7	20	0,008986	111,28
153,1	5	0,0025763	388,16	217,2	21	0,009387	106,53
156,8	5 1/2	0,0028091	355,99	219,6	26	0,009785	102,19
160,2	6	0,0030402	328,93	221,9	23	0,010182	98,21
163,5	6 1/2	0,0032683	305,98	224,2	24	0,010575	94,56
166,5	7	0,0034911	286,12	226,3	25	0,010968	91,17
169,4	7 1/2	0,0037217	268,82	236,3	30	0,012903	77,50
172,1	8	0,0039434	253,59	244,8	35	0,014663	68,20
177,1	9	0,0043865	227,98	252,5	40	0,016644	60,08
181,6	10	0,0048226	207,36	259,5	45	0,018497	54,06
186,0	11	0,0052557	190,27	265,9	50	0,020306	49,31
190,0	12	0,0056834	175,96				

TROISIÈME TABLEAU.—*Densité et volume de la vapeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités le volume et la densité de l'eau à* 0 :

De *cent* à *mille* atmosphères, d'après la formule empirique.

TEMPÉRATURES.	FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	DENSITÉ.	VOLUME.	TEMPÉRATURES.	FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	DENSITÉ.	VOLUME.
311,36	100	0,037417	26,72	462,71	600	0,17791	5,621
363,58	200	0,068635	18,570	478,45	700	0,20318	4,921
397,65	300	0,097671	10,238	492,17	800	0,2279	4,387
423,57	400	0,12531	7,978	505,16	900	0,2522	3,965
444,70	500	0,15202	6,578	516,76	1000	0,276	3,622

155. Densité des vapeurs de diverses substances. (Voy. le tableau de densités, page 247.)

Les densités des vapeurs de tous les liquides ne peuvent pas être déterminées par le procédé que nous venons de décrire, mais l'on doit à M. Dumas un autre procédé dont il s'est servi avec succès dans l'important travail qu'il a publié sur ce sujet (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXIII, p. 337). M. Dumas prend un ballon à col effilé (Fig. 19, Pl. 10); il y met une quantité suffisante du liquide qu'il veut soumettre à l'expérience, puis il chauffe ce ballon dans un bain d'eau, d'acide sulfurique, ou d'alliage fusible. Quand le liquide commence à entrer en ébullition, l'on modère la température et l'on chauffe aussi également qu'il soit possible toute la surface du ballon, et même son col effilé. L'ébullition terminée, on chauffe encore avec les mêmes précautions jusqu'à une température un peu plus élevée; alors on note cette température avec soin, on observe le baromètre, et, d'un trait de chalumeau, on scelle la pointe effilée du ballon. Voici maintenant la série des opérations qui conduisent à la densité cherchée :

1° Après avoir préparé le ballon, et avant d'y mettre le corps solide ou liquide sur lequel on veut faire l'expérience, on le dessèche et l'on en fait une pesée exacte en le laissant ouvert; soient b son poids, d le poids de l'air déplacé, et c le poids de l'air qu'il contient, on a pour le poids de la matière du ballon

$$b+d-c.$$

2° Quand, après l'évaporation de tout l'excès du corps qu'il contient, le ballon a été scellé, refroidi, retiré du bain, lavé à l'extérieur et desséché, on le pèse de nouveau ; soient b' son poids, d' le poids de l'air déplacé, c' le poids de ce qu'il contient, on a aussi pour le poids de la matière du ballon

$$b'+d'-c',$$

d'où

$$c'=b'-b+d'-d+c.$$

Comme les deux pesées ne peuvent pas se faire de suite, s'il arrive que d' soit trop différent de d, on tiendra compte de la différence $d'-d$; ce qui sera facile, parce que l'on connaît le volume extérieur du ballon par la densité du verre et par le jaugeage dont nous allons parler, et aussi parce que l'on doit faire

la pesée dans un air assez sec pour qu'il soit permis de négliger l'influence de la vapeur hygrométrique.

La valeur de c se calcule par la capacité du ballon et par la température et la pression du moment de la première expérience ; ainsi nous pouvons regarder c' comme exactement connu.

3° Le poids c' se compose en général de deux parties : de la matière volatilisée, et d'une certaine quantité d'air qui n'a pas été chassée par l'ébullition ; pour défalquer le poids de cet air, on prend le ballon après la seconde pesée, on en plonge la pointe dans un bain de mercure, et on la brise ; aussitôt le mercure remplit le ballon, sauf l'espace occupé par l'air qui était mélangé avec la vapeur ; alors on enlève encore une portion du tube effilé, jusqu'à ce que l'ouverture soit assez large pour que l'on puisse faire passer l'air dans un tube gradué, afin d'en avoir le volume à une température connue et sous une pression connue. Cela fait, on en calcule le poids, on le retranche de c', et l'on a définitivement le poids de la substance qui était contenue dans le ballon au moment où il a été fermé.

Il y a encore ici une correction à faire, qui est importante et qui semble avoir été négligée par quelques observateurs : lorsqu'il est resté de l'air avec la vapeur, son poids étant déterminé comme nous venons de le dire, il faut en calculer la pression pour la température à laquelle on a fermé le ballon, en supposant que, mélangé avec la vapeur, il le remplissait comme elle ; cette pression trouvée, il faut la retrancher de la pression barométrique, pour avoir en définitive la pression de la vapeur elle-même. C'est ainsi que l'on parvient à connaître le poids c'_1 de la substance qui était en vapeur dans le ballon, sa force élastique h_1 et sa température t_1.

4° Il ne reste plus qu'à faire le jaugeage du ballon, qui a ici un double objet : c'est lui qui donne le volume de la vapeur, et c'est lui aussi qui donne le moyen de calculer c, ou le poids de l'air qui était contenu dans le ballon lors de la première pesée.

Le jaugeage se fait, soit par les volumes, soit par le poids, comme nous l'avons indiqué (**143**). On peut à volonté le faire avant ou après l'opération ; comme la capacité du ballon est au moins de 500 ou de 600 centimètres cubes, une erreur de jaugeage qui s'élèverait même à 1 centimètre cube n'aurait pas une influence sensible sur le résultat. Représentons par v la capacité du ballon réduite à 0.

5° Toutes ces opérations étant faites, représentons par ϖ' le poids spécifique de la vapeur dans les conditions de l'expérience, et par ϖ son poids spécifique à 0 sous 76, nous aurons

$$\varpi' = \frac{c'_1}{v(1+kt_1)}, \quad \text{et} \quad \varpi' = \varpi . \frac{h_1}{76} . \frac{1}{1+at_1}$$

d'où il résulte enfin

$$\varpi = \frac{c'_1}{v} . \frac{76}{h_1} . \frac{1+at_1}{1+kt_1}.$$

Pour ceux qui voudront appliquer les formules, nous rapporterons les données d'une expérience sur l'iode faite par M. Dumas.

107^{gr},532, ballon plein d'air sec à 24° et 0^{m},757.

110^{gr},025, ballon plein de vapeur et d'air à 185° et 0^{m},757.

66$^{c.c}$ air mêlé à la vapeur, mesuré sur l'eau à 22° et 0^{m},757.

664^{gr},550, ballon plein d'eau à 22°.

On trouvera pour la densité de l'iode, par rapport à l'air, c'est-à-dire pour ϖ divisé par 0,0012995, le nombre 8,7873, nombre un peu différent de celui qui a été donné par M. Dumas, sans doute à cause de quelques corrections qui auront été faites autrement.

Au maximum de tension, les vapeurs de tous les liquides connus augmentent de densité à mesure que la température s'élève. D'où il suit que tout liquide peut, à une température plus ou moins haute, disparaître complétement dans un espace un peu plus grand que celui qu'il occupe. C'est aussi ce que M. Cagniard de La Tour a fait voir pour l'alcool, l'éther et le sulfure de carbone. Il a de plus observé la température à laquelle se produit le phénomène, et mesuré la tension qu'exerce alors la vapeur. Pour cela, il faisait ses expériences dans un tube recourbé, semblable à peu près à un baromètre à siphon (Fig. 4, Pl. 11). La branche courte avait 4 à 5 millimètres de diamètre, elle contenait le liquide; et la plus longue, 1 millimètre seulement; elle contenait de l'air : mais le liquide et l'air étaient séparés par du mercure qu'on avait d'avance versé dans la courbure quand les deux branches étaient ouvertes; le mercure repoussé par la pression pouvait remplir toute la longueur du tube à air. Les deux branches étant scellées, la colonne d'air, de plus en plus réduite, faisait l'office de manomètre, pour marquer la tension de la vapeur; quant à sa température, elle était donnée par celle du bain

d'huile fixe, dans lequel on plongeait l'extrémité inférieure de l'appareil et toute la longueur de la courte branche.

L'instant de la disparition et de la réduction complète en vapeur arrive dans les circonstances et aux conditions suivantes :

	Température de disparition.	Volume de la vapeur par rapport au volume du liquide.	Tension de la vapeur en nombre d'atmosphères.
Alcool (à 36° Baumé)..	259°	3	119 atm.
Éther..............	200	2	37 »
Sulfure de carbone....	275	2	78 »

156. Loi de Mariotte. — Liquéfaction des gaz. — MM. OErsted et Despretz avaient fait des expériences pour reconnaître si la loi de Mariotte s'applique exactement aux différents gaz comme à l'air atmosphérique, et ils avaient constaté que les gaz qui se liquéfient aisément ont une compressibilité croissante. M. OErsted paraissait penser que l'écart n'avait lieu que près du point de liquéfaction ; mais les expériences de M. Despretz lui indiquaient que cet écart se montre dès le commencement de la compression. Il m'a semblé nécessaire de reprendre ce sujet. La loi de Mariotte est une loi si fondamentale, qu'il importe de savoir quels sont les fluides élastiques qui obéissent à cette loi, et quels sont ceux qui s'en écartent.

Mon appareil est représenté dans la figure 20 (Pl. 10); il se compose de deux tubes pareils de cristal *a* et *b*, de 2 mètres de longueur, exactement calibrés, et fixés par leur extrémité inférieure dans un réservoir de fonte *d*, rempli de mercure ; un tube de fer *c* établit la communication entre le réservoir *d* et un second réservoir *d'* pareillement de fonte. Au sommet de celui-ci est ajusté un piston plongeur *e*, qui s'enfonce et se relève au moyen de la vis *f*, qui porte en haut une traverse *g*, destinée à la faire mouvoir. Le réservoir *d'* n'est pas complétement rempli de mercure ; il y a en haut un espace *h* contenant de l'huile; et c'est seulement dans l'huile que le piston plongeur s'enfonce.

On comprend qu'au moyen de cette disposition, il est facile, en tournant la vis, d'exercer des pressions de plusieurs centaines d'atmosphères ; mais je me suis arrêté à 100 atmosphères, parce qu'il est difficile d'ajuster les tubes au réservoir pour qu'ils tien-

nent bien, et restent parfaitement immobiles sous des pressions beaucoup plus considérables.

Le diamètre intérieur des tubes était de 2 à 3 millimètres.

Avant la graduation, ils étaient effilés à la partie supérieure, et l'on pouvait plusieurs fois briser et refaire la pointe sans produire un changement appréciable dans les divisions. C'est par l'extrémité supérieure qu'ils étaient remplis d'air ou de gaz parfaitement desséchés; ensuite on les scellait au chalumeau.

Les gaz sur lesquels j'ai opéré avaient été préparés avec beaucoup de soins par MM. Favre et Silbermann, qui m'ont secondé dans ces expériences.

Deux cathétomètres disposés l'un au-dessus de l'autre servaient à observer les divisions auxquelles le mercure parvenait dans les tubes sous les différentes pressions.

Au commencement, les deux tubes manométriques étaient remplis d'air, afin de faire une nouvelle vérification des divisions; ensuite, en brisant la pointe supérieure de l'un d'eux, on le remplissait du gaz que l'on voulait soumettre aux expériences comparativement avec l'air.

Voici maintenant les principaux résultats auxquels je suis parvenu :

1° Jusqu'à 100 atmosphères, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, le bioxyde d'azote, et l'oxyde de carbone, suivent la même loi de compression que l'air atmosphérique.

2° Le gaz sulfureux, la gaz ammoniac, l'acide carbonique et le protoxyde d'azote commencent à être notablement plus compressibles que l'air, dès que leur volume est réduit au tiers ou au quart, et l'on ne peut pas douter que, pour des changements de volume encore moindres, il ne soit possible de constater que déjà ils s'écartent de la loi de Mariotte.

3° Le gaz hydrogène protocarburé et le gaz hydrogène bicarburé ne se liquéfient pas sous la pression de 100 atmosphères, la température étant de 8 ou 10°, et cependant ils ont une compressibilité sensiblement plus grande que celle de l'air.

Pour donner une idée des variations que la compressibilité éprouve, je citerai seulement une série pour chacun des quatre gaz suivants : acide carbonique, protoxyde d'azote, hydrogène protocarburé, hydrogène bicarburé.

PRESSIONS.	VOLUMES théoriques.	ACIDE carbonique.	PROTOXYDE d'azote.	HYDROGÈNE proto-carburé.	HYDROGÈNE bicarburé.
1 atm.	1	1	1	1	1
2	0,5	1	0,996	0,998	0,994
4	0,25	1	0,988	0,995	0,989
5	0,20	0,989	0,983	0,992	0,986
6,67	0,15	0,980	0,971	0,989	0,983
10	0,10	0,965	0,956	0,981	0,972
15,38	0,065	0,934	0,923	0,949	0,962
20	0,050	0,919	0,896	0,956	0,955
25	0,040	0,880	0,849	0,951	0.948
33,3	0,030	0,808	0,787	0,951	0,931
40	0,025	0,739	0,732	0,940	0,919
50	0,020	»	»	0,907	0,899
83	»	»	»	»	0,850

Les nombres contenus dans ce tableau ont été obtenus de la manière suivante. On a divisé le volume v' observé sous une certaine pression, par le volume v qui était donné par l'air sous la même pression.

On voit que ces quotients vont en décroissant pour les quatre gaz dont il s'agit, et qu'ils décroissent assez régulièrement.

L'acide carbonique s'est liquéfié à 45 atmosphères, la température étant de 10°; le protoxyde d'azote s'est liquéfié à 43 atmosphères, la température étant à 11°; le liquide paraît être d'une limpidité parfaite.

A 10°, le gaz ammoniac s'est liquéfié sous 5 atmosphères; le liquide a une teinte jaune verdâtre très-sensible.

A 8°, le gaz sulfureux s'est liquéfié à 2 atm. $\frac{1}{2}$.

Dans toutes les liquéfactions que j'ai eu occasion d'observer, il a toujours été possible d'augmenter beaucoup la pression, sans que la totalité du gaz passât à l'état liquide; et cependant je regarde comme certain qu'il n'y avait ni air, ni gaz permanent mélangé avec le gaz soumis à l'expérience.

Thilorier a attaché son nom à une expérience importante : c'est lui qui le premier est parvenu à obtenir en grandes masses l'acide carbonique à l'état liquide et à l'état solide. Nous venons de voir qu'à 10° ce gaz se liquéfie sous une pression de 45 atmosphères. Ce liquide étant contenu dans un réservoir assez résistant, si on lui donne issue, peu à peu, en ouvrant un robinet de forme convenable, on obtient des flocons ou plutôt des

filaments d'une blancheur éclatante, formant une masse semblable à du coton. Au moment où le liquide n'a plus à supporter que la pression atmosphérique, il se vaporise vivement, et la chaleur latente qu'il absorbe abaisse la température au point de déterminer la congélation de la portion restante. Sa température est en effet de 50 ou 60° au-dessous de zéro. Abandonné à lui-même au contact de l'air, l'acide carbonique solide ne se liquéfie pas, même dans une atmosphère de 15 ou 20° de chaleur, mais il disparaît peu à peu, la simple évaporation emportant le calorique qui lui est fourni par les corps environnants.

Lorsqu'on a réuni dans un vase isolé un demi-litre ou un litre d'acide carbonique solide, et que l'on y verse de l'éther sulfurique, on compose une sorte de pâte semi-fluide, qui se conserve plus longtemps que l'acide carbonique lui-même, et qui donne aussi des contacts plus parfaits, soit avec les thermomètres qui en mesurent la température, soit avec les corps que l'on y fait refroidir. C'est sur cette pâte que j'ai fait autrefois des expériences, et j'ai constaté (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1837, t. IV, p. 513) :

1° Que sa température observée avec mon pyromètre à air précédemment décrit (**132** et **135**), est de —79° ; M. Regnault a répété cette expérience en 1849 (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVI, p. 258); il a trouvé —78°,21 ;

2° Que la congélation du mercure, ou plutôt sa fusion, se fait à —40°,5 ;

3° Que les thermomètres à alcool gradués à la glace fondante et au mercure fondant, marchent d'accord avec le thermomètre à air;

4° Que l'intensité du courant électrique produit par le contact du bismuth et du cuivre, est proportionnelle à la température depuis 8° au-dessous de zéro, jusqu'à 100° au-dessus.

L'appareil que Thilorier avait imaginé a dû être construit plus solidement pour éviter tout danger d'explosion; cependant on a conservé la forme primitive, surtout les fermetures hermétiques et les robinets ingénieux que l'on doit à l'habile inventeur.

MM. Deleuil, père et fils, qui n'ont pas moins de succès dans les constructions les plus difficiles que dans les instruments ordinaires, ont adopté récemment la disposition suivante (Fig. 11, 12, 15, Pl. 11). *g* est le générateur où se produit l'acide liquide ; *r* est le récipient où il passe par une sorte de distillation et d'où on le tire pour le soumettre à l'expérience. Ces deux

pièces, exactement pareilles, qui tournent l'une et l'autre sur deux pivots, se composent d'un vase de fonte, de 6 litres de capacité, très-épais et d'une double armature de fer forgé. Le générateur *g* (*vu en élévation*), montre d'abord quatre fortes bandes de fer *f*, soudées ensemble à leur point de croisement, sous le fond du vase de fonte, et repliées ensuite à chaud sur toute la hauteur dans des sillons ménagés à cette fin; puis quatre cercles de fer, pareillement larges et épais, mis de force pour maintenir et consolider l'ensemble. Le récipient (*vu en coupe*), montre la forme intérieure, l'épaisseur de la fonte et celle des armatures; il a de plus un tube plongeur qui ne se trouve pas dans le générateur et qui sert à l'échappement de l'acide carbonique liquide; par là, on se met en grande partie à l'abri des parcelles de glace ou de sulfate de soude qui viendraient obstruer les issues. Le tube de cuivre sans soudure *abc*, peut se mettre et s'ôter à volonté; il sert à établir la communication entre le générateur et le récipient; son diamètre intérieur est d'environ 1 millimètre.

La figure 12 représente, sur une échelle quatre fois plus grande, une coupe du bouchon qui ferme le générateur et le récipient; sa partie inférieure *dd* se visse sur le vase de fonte et presse sur un collier de plomb ajusté pour la recevoir (on a supprimé ici les quatre chevilles *e* (Fig. 15) qui servent à la faire tourner et à la serrer à coups de maillet); sa partie supérieure *pp* se visse sur la première, elle est percée de part en part de deux conduits en croix. Le conduit horizontal reçoit d'un côté le tube *abc*, et de l'autre le bec d'échappement représenté aussi à part (Fig. 11); le conduit vertical reçoit le robinet. Celui-ci est composé de deux tiges d'acier *xy* et *zu*; la tige *xy* a son axe foré d'un trou étroit, et son extrémité supérieure rodée en segment de sphère, comme on le voit dans la perspective qui est un peu au-dessous; cette perspective fait voir aussi l'anneau de plomb par lequel elle est ajustée dans la partie *dd* du bouchon pour y former une fermeture étanche quand on vient presser cet anneau en vissant fortement la partie supérieure *pp* du bouchon; la tige *zu* a sur sa longueur quatre épaisseurs différentes; c'est son extrémité inférieure *z* qui fait robinet, parce qu'elle est convexe et rodée sur la cavité *y* où elle vient s'appliquer hermétiquement. On comprend alors que pour ouvrir et fermer le robinet il faut que la tige *zu* soit soulevée et abaissée; pour accomplir ce mouvement,

sa partie moyenne et cylindrique glisse dans un anneau de plomb dont on voit la coupe, et qui fait l'office de boîte à étoupes, tandis que sa partie supérieure est filetée et arrêtée par un petit écrou dans la pièce *vv*; celle-ci est elle-même une vis qu'il suffit alors de faire tourner dans un sens ou dans l'autre pour ouvrir ou fermer le robinet.

Les fermetures à anneaux de plomb du conduit horizontal sont exactement pareilles à celle de la tige *xy*; je dois seulement ajouter que quand on supprime le tuyau *abc*, ou le bec d'échappement, on les remplace l'un et l'autre par une tige pleine portant son anneau de plomb qui s'ajuste sur le siége correspondant, et portant aussi son écrou pareil à *mn*, ou à *m'n'*.

Voici maintenant comment l'on procède à la formation du gaz. On enlève le tube *abc* et ensuite le bouchon du générateur; on y met 1800 grammes de bicarbonate de soude très-pur et pulvérisé très-fin, puis 3 litres d'eau à 38° de température. Alors on introduit le cylindre de laiton mince *hi* contenant 1 kil. d'acide sulfurique à 66°; le bouchon étant remis et le robinet fermé, on fait tourner le vase sur ses pivots pour verser l'acide sulfurique et mêler les éléments. Bientôt l'action s'exerce, l'acide carbonique se dégage, se comprime et se liquéfie en très-grande partie dans l'espace qui lui est réservé. Après 7' environ d'agitation continuelle, la décomposition est accomplie et l'on peut procéder à la distillation. Pour cela on ajuste le tube *abc*, on ouvre le robinet du générateur, ensuite celui du récipient, le gaz afflue dans celui-ci avec un bruit sensible, et 5' environ suffisent pour cette distillation. Il faut faire sept ou huit opérations pareilles pour avoir dans le récipient 4 ou 5 litres d'acide liquide.

La réaction chimique dégage une chaleur sensible, et dans les dernières opérations, le générateur arrive à une température qui paraît dépasser 60°; la tension de l'acide carbonique devient alors énorme. Il est probable qu'elle s'élève à plus de 200 atmosphères, tandis que dans le récipient, malgré la chaleur latente dégagée, la température tend plutôt à s'abaisser qu'à s'élever.

Pour tirer l'acide carbonique du récipient on emploie le *récepteur* de Thilorier (Fig. 10) que l'on tient par les manches *m*, à double enveloppe; les deux parties de ce récepteur se réunis-

Digitized by Google

sent à baïonnette; l'une d'elles porte une douille *n* qui reçoit le bout de l'ajutage, et une lame courbe *l*, contre laquelle frappe le gaz au moment où il pénètre à l'intérieur; il prend ainsi un mouvement très-rapide de rotation, qui le façonne en boule de la grosseur d'un œuf. On le jette dans une capsule de porcelaine, on verse à l'instant de l'éther qui forme avec lui la pâte dont nous avons parlé; il faut souvent plus de quinze ou vingt opérations pour en avoir un demi-litre. Alors on peut congeler presque subitement plusieurs kilogrammes de mercure, et faire toute la série des expériences qui exigent une température de 79° au-dessous de zéro.

M. Faraday a publié récemment (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XV, nov. 1845) une nouvelle série de recherches importantes sur la liquéfaction des gaz et leur solidification. Il s'est appliqué surtout à soumettre ces corps en même temps à une forte compression et à un refroidissement considérable. La compression était produite par un système de deux pompes de diamètres différents, et le froid le plus intense était obtenu en mettant sous la cloche d'une bonne machine pneumatique la pâte d'acide carbonique et d'éther dont nous venons de parler, et qui, exposée naturellement à l'air, donne déjà une température de 79 à 80° au-dessous de zéro. Les degrés de froid que l'on peut produire ainsi dépendent de l'activité que l'on donne à la machine, puisqu'en réduisant de plus en plus la pression, l'on favorise l'évaporation et par conséquent le refroidissement. Voici les températures en degrés centigrades et les pressions correspondantes sous la cloche de la machine pneumatique, exprimées en millimètres :

Température.	Pression.	Température.	Pression.	Température.	Pression.
— 77°	721^{mm}	— 87°	188^{mm}	— 99°	61^{mm}
— 80	493	— 91	137	— 107	35
— 85	239	— 95	86	— 110	30

M. Faraday ne dit pas quelle était la température ambiante; mais puisqu'il a dû réduire la pression à 492^{mm}, pour obtenir —80°, je suis porté à croire que la température ambiante était assez élevée, puisque j'avais obtenu ce degré de froid ou à peu près en opérant à l'air libre, dans un milieu ambiant qui était à 3 ou 4° au-dessous de zéro.

A —80°, sous une pression inférieure à 1 atmosphère, M. Fa-

raday a obtenu à l'état liquéfié ou à l'état solide les gaz suivants :

Chlore.	Hydrogène arséniqué.
Cyanogène.	Acide iodhydrique.
Ammoniaque.	Acide bromhydrique.
Acide sulfhydrique.	Acide carbonique.

Voici les points de fusion qu'il a observés pour les gaz qui ont pu être solidifiés :

Gaz.	Fusion.	Gaz.	Fusion.	Gaz.	Fusion.
Cyanogène.	— 35°	Oxyde de chlore.	— 60°	Acide sulfhydrique. .	— 86°
Acide iodhydrique. . .	— 51	Ammoniaque. . .	— 75	Acide bromhydrique.	— 8
Acide carbonique. . . .	— 58	Acide sulfureux. .	— 76	Protoxyde d'azote. .	— 100

Les six gaz suivants n'ont pu être solidifiés même à — 110°.

Gaz oléfiant.	Hydrogène protophosphoré.	Acide chlorhydrique.
Acide fluosilicique.	Acide fluoborique.	Hydrogène arséniqué.

Les cinq gaz dans lesquels j'avais reconnu la même loi de compressibilité que dans l'air, savoir, hydrogène, oxygène, oxyde de carbone, azote et bioxyde d'azote, n'ont donné à M. Faraday aucun signe de liquéfaction, comme on pouvait s'y attendre, et cependant il les a maintenus à — 110° : les deux premiers sous 27 atmosphères, les deux derniers sous 50 atmosphères, et l'oxyde de carbone sous 40.

M. Faraday a obtenu les maximums de tension indiqués ci-dessous pour trois des gaz qui se liquéfient le plus facilement.

Température.	Gaz sulfureux. atm.	Cyanogène. atm.	Ammoniaque atm.
— 18°	0,7	1,2	2,5
0	1,5	2,4	4,4
4,4	1,8	2,8	5,0
32	4,3	6,2	11,0
38	5,1	7,3	»

Le tableau suivant contient pour les gaz liquéfiés les diverses tensions qu'ils ont manifestées, exprimées en atmosphères, et les températures correspondantes, exprimées en degrés centigrades.

TEMPÉRATURE.	GAZ oléfiant.	ACIDE carboniq.	PROTOXYDE d'azote.	GAZ chlorhydr.	GAZ sulfhydriq.	HYDROGÈNE arséniqué.
— 87,2	»	»	1,0	»	»	»
84,4	»	»	1,1	»	»	»
81,7	»	»	1,2	»	»	»
78,9	»	1,2	1,4	»	»	»
76,1	»	»	1,6	»	»	»
73,3	9,3	1,8	1,8	1,8	1,0	»
70,5	»	»	2,0	»	»	»
67,8	10,3	2,8	2,3	2,4	1,2	»
65,0	»	»	2,7	»	»	»
62,2	11,3	3,9	3,1	3,1	1,3	»
59,4	»	4,6	3,6	»	»	0,9
56,7	12,5	5,3	4,1	4,0	1,6	1,1
53,9	»	»	4,7	»	»	»
51,1	13,9	7,1	5,4	5,1	1,9	1,4
48,3	»	»	6,1	»	»	»
45,5	15,4	8,9	6,9	6,3	2,4	1,8
42,8	»	»	7,8	»	»	»
40,0	17,0	11,1	8,7	7,7	2,9	2,3
37,2	»	»	9,7	»	»	»
34,4	18,9	13,5	10,9	9,2	3,5	2,8
31,7	»	»	12,0	»	»	»
28,9	21,2	16,3	13,3	10,9	4,2	3,5
26,1	»	17,8	14,7	»	»	»
23,3	23,9	19,4	16,1	12,8	5,1	4,3
20,5	»	»	17,7	13,9	»	4,7
17,8	27,2	22,8	19,3	15,0	6,1	5,2
15,0	»	24,8	21,1	»	»	»
12,2	31,7	26,8	22,9	17,7	7,2	6,2
9,4	»	29,1	24,8	»	»	»
6,7	36,8	30,7	26,8	21,1	8,4	7,4
3,9	»	»	28,9	23,1	»	»
1,1	42,5	37,2	31,1	25,3	9,9	8,7
+ 1,7	»	»	33,4	»	»	»
2,4	»	»	»	30,7	11,8	10,0

M. Natterer a obtenu des volumes assez considérables de protoxyde d'azote liquide en suivant le procédé que Thilorier avait d'abord employé pour l'acide carbonique, c'est-à-dire au moyen d'une pompe de compression. Son appareil, perfectionné par Bianchi, est représenté (Fig. 8, 9, Pl. 11). *a*, réservoir qui reçoit le gaz comprimé, vu en place (Fig. 8) et beaucoup plus en grand (Fig. 9); *b*, enveloppe où l'on met un mélange réfrigérant; *c*, corps de pompe; *d*, tige du piston; un courant d'eau rafraîchit sans cesse le corps de pompe, qui sans cela s'échaufferait beaucoup; *e*, tube d'aspiration, par lequel la pompe prend le gaz dans de grands sacs de tissu imperméable où il a été recueilli; on connaît approximativement

le volume qu'ils contiennent; *m*, manivelle adaptée au volant qui sert à donner le mouvement à la pompe.

Le réservoir a une capacité de 7 ou 8 décilitres; quand il a reçu assez de gaz pour être à peu près plein de liquide, on le dévisse, on le dispose sur une table, et au moyen de l'ajutage d'échappement qui est vu en haut (Fig. 9), on reçoit le liquide dans des verres, ou plutôt dans des tubes d'environ 2 centimètres de diamètre. Ces tubes doivent être tenus dans des flacons dont l'air est desséché par quelques fragments de chlorure de calcium (Fig. 18).

Le protoxyde d'azote liquide se conserve ainsi dans l'air ambiant, et s'y maintient à une température fixe; les thermomètres à alcool que j'avais gradués en 1837, en prenant pour points de repère la pâte d'acide carbonique et le mercure en fusion, m'ont indiqué une température de — 88°,5; M. Regnault a trouvé ensuite par d'autres procédés — 88°. C'est là le point d'ébullition du protoxyde d'azote, sous la pression atmosphérique; ce liquide se trouve dans l'air ambiant à peu près comme ferait de l'eau dans une étuve chauffée à environ 200°; refroidie par une ébullition continue, elle se maintiendrait à 100°, par conséquent de 100° plus froide que l'air de l'étuve.

Le mercure qu'on laisse tomber en filet mince avec une pipette, dans le tube de protoxyde d'azote, se gèle rapidement, formant au fond du tube une masse cylindrique (Fig. 18).

L'eau se gèle à la surface du protoxyde, mais il faut la verser en fines gouttelettes; à raison de sa grande capacité pour la chaleur, elle réchauffe trop vivement le liquide, qui ferait explosion s'il recevait à la fois un volume d'eau d'un demi-centimètre cube.

On sait que le protoxyde d'azote entretient la combustion presque aussi bien que l'oxygène; son état liquide et sa basse température ne lui ôtent pas cette propriété; aussi en jetant dans le tube un fragment de charbon allumé, sa combustion devient extrêmement vive au moment où il touche le liquide (Fig. 18). On a ainsi, dans un petit espace, presque au même point, les plus grands degrés de chaleur et de froid que nous puissions produire : la surface du charbon flottant qui est à environ 2000° et celle du liquide sur lequel il repose qui est à — 88°.

157. Des vapeurs mélangées avec les gaz. — Les liquides qui ne se combinent pas chimiquement peuvent bien être mêlés pendant quelques instants, mais ils se séparent peu à peu, et se

dégagent l'un de l'autre pour se superposer dans l'ordre de leurs densités, comme l'huile se superpose à l'eau. Si les gaz et les vapeurs avaient des propriétés pareilles, tout serait changé sur la terre : on verrait, par exemple, les vapeurs qui se forment à la surface des eaux s'élever comme des ballons, en vertu de leur légèreté spécifique ; et, poussées de la sorte jusqu'aux dernières couches de l'atmosphère, elles en sortiraient par leur élasticité pour se répandre de toutes parts dans le vide ; l'évaporation étant continuelle, cette ascension se renouvellerait sans cesse ; à la fin, les lacs et les bassins des mers seraient à sec, et toutes les eaux de la terre seraient suspendues au-dessus de l'atmosphère.

Il est donc visible que les fluides élastiques, dans leurs mélanges, n'obéissent pas, comme les liquides, aux lois de la densité.

Cette vérité fondamentale a été mise hors de doute par une expérience directe. Berthollet avait fait descendre dans les caves de l'Observatoire deux ballons séparés par un robinet : l'un était plein d'hydrogène, et l'autre d'acide carbonique, à la même pression ; après les avoir disposés, l'hydrogène en haut et l'acide carbonique en bas, on attendit longtemps avant de tourner le robinet pour établir la communication. Les deux gaz étaient certainement à la même température, dans le repos le plus absolu et à l'abri de toute agitation. Cependant le mélange se fit assez promptement : la moitié de l'hydrogène, malgré sa légèreté, descendit dans le ballon inférieur, et la moitié de l'acide carbonique, malgré sa densité, s'éleva dans le ballon supérieur. Ainsi, chacun des gaz pénétra l'autre, et s'étendit, par sa force expansive, pour occuper tout l'espace qui lui était offert : en doublant de volume, chacun eut son élasticité réduite à moitié ; mais l'élasticité totale resta la même, c'est-à-dire égale à la somme des élasticités partielles.

Ce qui arrive pour deux gaz mélangés arrive pour un plus grand nombre, et le principe général du mélange des fluides élastiques est le suivant : *Lorsqu'on accumule dans le même espace divers fluides élastiques qui sont sans action chimique, chacun se répand dans toute l'étendue de cet espace, et l'élasticité du mélange est égale à la somme des élasticités que prendrait chacun des fluides, s'il était seul.*

Cette vérité peut être constatée pour les vapeurs, au moyen de l'appareil suivant : *t* (Fig. 5, Pl. 10) est un tube large et

gradué, portant à chaque extrémité un robinet de fer; le robinet supérieur *s* n'est pas *percé* de part en part, il est seulement *creusé*, et s'appelle, pour cette raison, *robinet à capsule*. A sa partie inférieure, le tube *t* communique au tube *t'*, qui est plus long et plus étroit. On peut enlever le robinet supérieur pour faire passer dans l'appareil un courant d'air sec; alors on remet le robinet, on verse du mercure par la branche ouverte, on incline plus ou moins pour faire sortir l'air excédant, et l'on arrive aisément à avoir, dans le grand tube *t*, de l'air sec qui se trouve sous la pression atmosphérique. Ensuite, on met un liquide au-dessus du robinet à capsule, on tourne ce robinet toujours dans le même sens pour faire tomber le liquide goutte à goutte, et l'on observe les phénomènes suivants. On voit le mercure baisser peu à peu, mais lentement quand on n'agite pas. Donc, la vapeur se forme dans l'air, et se forme moins vite que dans le vide; ce qu'on pourrait conclure aussi des évaporations qui se font librement dans l'atmosphère. Mais, ce qui est curieux à observer, c'est que cette vapeur a un maximum de tension, et un maximum qui est dans l'air exactement le même que dans le vide. En effet, si l'on verse du mercure par la branche ouverte pour ramener le mélange gazeux à son volume primitif, on voit que sa force élastique est plus grande qu'elle n'était d'abord d'une quantité qui est précisément égale à la tension maximum de la vapeur, pour la température où l'on opère. On arrive encore à la même conclusion, lorsqu'on fait passer le mélange d'air et de vapeur à des pressions plus fortes, en versant une nouvelle quantité de mercure par la petite branche, ou, lorsqu'on le fait passer à des pressions plus faibles, en ouvrant le robinet pour laisser sortir du mercure. Dans tous les cas, en tenant compte des variations de volume que l'air éprouve, on voit que, constamment, la force élastique du mélange est la somme des forces élastiques de l'air et de la vapeur.

L'appareil que nous venons de décrire ne peut pas servir aisément pour les liquides qui ont, comme l'éther et l'alcool, la propriété de dissoudre les corps gras, parce qu'en traversant les robinets supérieurs ils dissolvent la graisse qui les enduit, et l'appareil fuit. M. Gay-Lussac a remédié à cet inconvénient en supprimant tout à fait les robinets supérieurs. Son appareil est représenté (Fig. 6, Pl. 10). On le remplit aux trois quarts de

mercure, en l'inclinant convenablement. L'air qui occupe sa partie supérieure est d'abord sous la pression atmosphérique ; alors, on verse le liquide dans la petite branche ouverte, on tourne le robinet inférieur pour faire échapper un peu de mercure, et le liquide de la branche ouverte est bientôt aspiré dans la branche fermée ; cela fait, on verse de nouveau du mercure dans la branche ouverte pour ramener le mélange d'air et de vapeur au volume même qui était primitivement occupé par l'air seul, et l'on observe l'excès de pression, qui est la force élastique de la vapeur du liquide pour cette température.

J'ai fait construire à M. Ruhmkorff un appareil qui offre quelques avantages pour varier les expériences sur ce sujet : il est représenté (Pl. 11, Fig. 19, 20). *a* est un réservoir rempli d'huile de pied de bœuf, qui est peu altérable à l'air ; *b* et *c*, deux tubes qui communiquent avec lui, le premier très-court reçoit la pression, le second ayant au moins un mètre de longueur donne la mesure de la pression par la hauteur de la colonne soulevée ; *d*, un piston plongeur qui pénètre plus ou moins dans le liquide : la vis *v* le fait monter ou descendre ; *f*, cloche de métal, portant un robinet à capsule *g*, et une cheville latérale *h* pour établir la communication entre l'intérieur et l'extérieur ; cette cloche couvre le tube *b*, elle s'adapte à vis. Lorsqu'elle est en place, on fait mouvoir le piston *d* pour amener le liquide à ses deux repères de niveau dans les tubes *b* et *c* ; on ferme avec la cheville *h*, alors on fait entrer le liquide par le mouvement du robinet *g*, il tombe sur un papier sans colle disposé à cet effet ; à l'instant la vapeur se forme, et par le mouvement de la vis *v* on maintient le niveau de l'huile à son repère dans le tube *b*. Quand l'espace est saturé, la hauteur de la colonne soulevée dans le tube *c* donne la mesure de la pression.

Du fait général qui est établi par ces expériences, il résulte que la vapeur d'eau, par exemple, se comporte dans l'air comme dans le vide, avec cette seule différence que dans l'air l'équilibre de tension s'établit lentement, tandis que dans le vide il s'établit presque instantanément. Ainsi, aux températures de — 10°, 0°, 10°, 20°, 30°, un mètre cube d'espace vide est *saturé de vapeur* quand la tension est en millimètres 2,6 ; 5,0 ; 9,5 ; 17,3 ; 30,6 ; de même, un mètre cube d'air, pris à ces températures dans les plaines ou sur les montagnes, sera *saturé d'humidité* lorsque la vapeur y aura acquis les mêmes ten-

sions. Or, en jetant les yeux sur la table des densités de la vapeur, page 294, on voit que les poids correspondants sont respectivement en grammes : 2,9 ; 5,4 ; 9,7 ; 17,8 ; 29,4, c'est-à-dire qu'un mètre cube d'air à 30° peut contenir presque 30 grammes de vapeur ; s'il n'en contient que 15, il paraîtra *très-sec*, tandis qu'avec ce même poids, à 20°, il paraîtra très-humide, parce qu'il sera près du point de saturation. Voilà pourquoi l'air semble se *sécher* à mesure qu'il s'échauffe. (Voy. l'*Hygrométrie*, t. II, liv. VIII, *Météorologie*.)

La vapeur, mélangée avec un autre fluide élastique, se condense par deux causes, comme la vapeur isolée dans le vide, savoir : par un excès de pression, ou par un abaissement de température. Ainsi, l'air atmosphérique étant toujours humide, surtout dans les basses régions qui avoisinent la terre, si l'on prend, par exemple, un litre d'air à la température de 20°, sous la pression ordinaire de 760^{mm}, et que la vapeur, pour sa part, supporte 10^{mm} de cette pression, l'espace ne sera pas saturé d'humidité ; mais, en comprimant ce mélange gazeux, on augmentera la tension de la vapeur aussi bien que celle de l'air, et on les augmentera proportionnellement jusqu'à ce que la vapeur atteigne sa tension maximum ; alors, si on exerce une compression plus grande, la vapeur sera condensée en partie et se déposera sous forme de rosée sur les parois du vase. De même, en reprenant le même litre d'air, si on le refroidissait au lieu de le comprimer, on verrait encore la vapeur se condenser, et au même degré de refroidissement que si elle était seule et sans mélange d'aucun gaz. En généralisant ces conséquences, on voit que, dans un espace donné, dans un litre, par exemple, on peut renfermer autant de substances gazeuses que l'on voudra, sans que ces substances se gênent l'une l'autre : il faudra seulement exercer une pression égale à la somme des pressions que chacune d'elles peut supporter. Et si un tel mélange était soumis à des pressions croissantes ou à des degrés de froid de plus en plus intenses, il présenterait des phénomènes curieux par la liquéfaction successive des divers éléments, qui s'arrangeraient ensuite suivant l'ordre de leur densité.

Les mélanges gazeux présentent une question théorique très-importante, c'est la question de savoir si les molécules de diverses natures exercent une pression l'une sur l'autre ; si, par exemple, les molécules d'air pressent les molécules de vapeur

d'eau, et réciproquement. Tout semble indiquer qu'il n'y a de réaction mutuelle qu'entre les molécules de même espèce : cependant nous verrons, en étudiant la propagation du son dans les mélanges de cette nature, qu'il y a une communication uniforme de mouvement vibratoire, qui suppose une action à distance entre toutes les molécules sans distinction.

Pour compléter ces notions générales, nous indiquerons plusieurs problèmes qui peuvent se présenter dans la pratique.

1° Étant donné un vase *extensible*, contenant un volume v de gaz, qui exerce une pression p contre les parois, on demande quelle pression il exercera si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par f.

La pression deviendra évidemment $p+f$.

2° Étant donné un vase indéfiniment *extensible*, contenant un volume v de gaz, sous une pression p, déterminer le volume qu'il prendra si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par f; on suppose que ni la pression extérieure p ni la température ne changent pendant cette expérience.

A mesure que la pression intérieure augmente par la formation de la vapeur, elle diminue par l'expansion du gaz, et, comme elle doit pour l'équilibre rester égale à la pression extérieure p, il faudra, puisque la vapeur supporte f pour sa part, que le gaz supporte $p-f$; donc le volume v s'accroîtra au point de devenir $\frac{vp}{p-f}$.

3° Un mélange gazeux a une force élastique p à la température t; il prend une force élastique p' à la température t', sans que son volume change sensiblement : on demande s'il s'est formé des vapeurs ou s'il s'en est précipité.

S'il n'y avait aucune vapeur de développée ou de condensée, la pression deviendrait $\frac{1+at'}{1+at}$, ainsi, $p'-p.\frac{1+at'}{1+at}$ sera la force élastique de la vapeur perdue ou gagnée.

Ces formules sont des conséquences rigoureuses du principe général que nous avons énoncé; elles supposent qu'aucune action chimique ne s'exerce; mais s'il arrivait que, dans le mélange des fluides élastiques, il y eût combinaison en proportion définie, ou simplement dissolution de l'un par l'autre, ou enfin conden-

sation de l'un des fluides par les parois enveloppantes, il est évident que cette loi des tensions ne serait plus applicable.

M. Regnault avait eu des doutes à cet égard; il supposait surtout que, pour le mélange des vapeurs avec les gaz, l'appareil de Gay-Lussac pourrait bien n'avoir pas une exactitude suffisante; il a donc imaginé d'autres méthodes et fait sur ce point des expériences nombreuses et intéressantes (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XV, page 134, et *Comptes rendus de l'Acad.*, août 1854) qui conduisent aux conséquences suivantes :

1° Le principe est de nouveau vérifié et confirmé d'une manière générale;

2° Cependant les enveloppes de verre dans lesquelles on fait le mélange des vapeurs avec les gaz exercent une action hygroscopique plus ou moins forte pour liquéfier une partie de la vapeur; alors les couches voisines des parois n'ayant plus ici, comme dans le vide, la facilité de reprendre immédiatement leur point de saturation, il en résulte, dans la force élastique totale de la vapeur, une diminution qui varie suivant les circonstances; pour la vapeur d'eau, entre 0 et 40°, cette diminution s'élève à environ $\frac{1}{60}$ de la tension dans le vide; pour la vapeur de sulfure de carbone, à environ $\frac{1}{100}$; pour les vapeurs d'éther et de benzine, elle peut dans quelques cas s'élever à $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{30}$;

3° Dans l'acide carbonique la vapeur d'éther semble éprouver une diminution plus grande que dans l'air; mais cela tient sans doute à la solubilité de l'acide carbonique dans l'éther liquide;

4° Quand il s'agit du mélange de deux vapeurs dont les liquides se dissolvent, la tension du mélange est, pour chaque température, plus petite que la somme des tensions de ces vapeurs dans le vide :

Pour l'eau et l'éther, entre 15° et 24°, la tension est égale à celle du liquide le plus volatil;

Pour l'éther et le sulfure de carbone, entre —16° et 40°, et pour le chlorure de carbone et le sulfure de carbone, entre 8° et 48°, la tension du mélange est en général plus petite que celle du liquide le plus volatil; elle dépend d'ailleurs des proportions relatives des deux liquides;

Pour l'alcool et la benzine, entre 7° et 19°, la tension du mélange est plus grande que celle du liquide le plus volatil; elle reste comprise entre celle-ci et la somme des tensions.

CHAPITRE III.

De l'Ébullition et de l'Évaporation.

158. La transformation des liquides en fluides élastiques s'appelle en général *vaporisation*. Les liquides se vaporisent par *ébullition*, c'est-à-dire quand les vapeurs se forment au sein de la masse; et par *évaporation*, c'est-à-dire quand elles se forment à la surface.

Lorsqu'on observe l'ébullition d'un liquide, on ne voit en général qu'un mouvement plus ou moins rapide qui mêle toutes les parties de la masse et qui les agite dans tous les sens; mais quand on fait l'expérience dans un vase de verre, on aperçoit la cause toujours changeante qui produit ces mouvements. On reconnaît que des bulles de vapeur se forment sur les parois échauffées du vase, qu'elles s'élèvent en vertu de leur légèreté, et qu'elles viennent éclater à la surface : elles sont d'abord petites au moment où elles se forment, mais elles prennent du volume à mesure qu'elles s'élèvent; et celles qui partent des points du vase les plus chauds, sont celles qui se succèdent avec le plus de rapidité. Pour que ces bulles puissent se former et s'élever au milieu de la masse liquide qui les presse de toutes parts, il faut évidemment que la vapeur dont elles se composent ait une tension égale à la pression environnante; c'est là ce qui détermine les points d'ébullition des différents liquides, et aussi les points d'ébullition du même liquide soumis à des pressions différentes. Ainsi, la première condition de l'ébullition est que la température soit assez haute pour que la force élastique de la vapeur puisse vaincre toutes les pressions qui se font sentir dans la masse liquide. La seconde condition, comme nous l'avons déjà vu, est que la vapeur trouve à absorber le calorique latent nécessaire à sa formation.

De la première condition il résulte que tout ce qui fait varier la pression du liquide ou la tension de la vapeur fait changer aussi le point d'ébullition; et il résulte de la seconde que la rapidité de l'ébullition dépend seulement de la quantité de cha-

leur qui est fournie aux parois extérieures du vase dans un temps donné, et qui peut passer de là aux parois intérieures; puis à la portion du liquide qui se vaporise. Ces deux conséquences exigent quelques développements.

159. Du point d'ébullition. — Les causes qui peuvent faire varier le point d'ébullition d'un même liquide sont principalement la pression qu'il supporte et les substances qu'il peut tenir en dissolution; ensuite la cohésion du liquide et la nature du vase qui le contient exercent aussi quelque influence, mais dans des limites très-restreintes.

Influence de la pression. — Au niveau de la mer, sous la pression ordinaire de 760^{mm}, l'eau bout à 100^0; au sommet du mont Blanc, dont la hauteur est de 4775 mètres et où la pression atmosphérique est d'environ 417^{mm}, l'eau doit entrer en ébullition à la température pour laquelle la tension est 417^{mm}, c'est-à-dire 84^0 environ. Si l'on pouvait s'élever plus haut, la pression devenant moindre, l'ébullition se ferait à une température encore plus basse. En général, connaissant le tableau de la tension de la vapeur d'un liquide, son point d'ébullition *sous une pression donnée* sera facile à trouver, puisqu'il sera toujours le degré de chaleur qui donne à la vapeur une tension maximum capable de vaincre cette pression. Réciproquement, on pourra faire bouillir un liquide à une température donnée, puisqu'il suffira toujours de diminuer la pression au point qu'elle soit moindre que la tension du liquide pour cette température.

Par exemple, sous une pression de 30^{mm}, l'eau doit bouillir à 30^0, puisqu'à cette température la tension de l'eau est un peu plus grande que 30^{mm}; de même, sous des pressions de 20^{mm}, de 10^{mm}, de 5^{mm}, l'eau doit entrer en ébullition aux températures de 23^0, de 11^0 et de 0^0.

Ces conséquences se vérifient facilement de la manière suivante : on met de l'eau à 30^0 dans un vase de verre sous le récipient de la machine pneumatique, et après quelques coups de piston, quand l'éprouvette ne marque plus que 30^{mm} de tension, l'ébullition commence avec une grande force, comme si l'eau était sur un feu très-vif et soumise à la pression de l'air. Cette ébullition cesse bientôt, parce que la vapeur remplit le récipient et presse la surface liquide; mais, par de nouveaux coups de piston, on enlève la vapeur comprimante et on fait recommencer l'ébullition. Avec nos machines ordinaires, il serait impos-

sible de faire bouillir de l'eau à 0, puisqu'il serait impossible de maintenir le vide à 5^{mm}, à cause de la vapeur qui s'exhale sans cesse de la surface du liquide.

Cependant, si à côté de l'eau on dispose sous le récipient une substance capable d'absorber la vapeur et présentant une grande surface, on parvient encore à produire l'ébullition à la température zéro; il est vrai que cette ébullition ne peut pas être longtemps soutenue, comme nous le verrons page 330 (Fig. 11, Pl. 10), parce que le liquide éprouvant par cela même une nouvelle perte de chaleur, il arrive qu'il se congèle et se transforme en glace en même temps qu'il est bouillant.

L'appareil qui est représenté (Fig. 14, Pl. 10) montre ces phénomènes d'une manière encore plus frappante. C'est un ballon *a* à long col, fermé par un bouchon *b*. Ce ballon est à moitié plein d'eau; on le met en pleine ébullition, et, quand tout l'air est chassé, on met le bouchon *b*; ensuite on le tourne dans la position que représente la figure. Lorsqu'il est abandonné à lui-même, on n'observe pas d'ébullition sensible, cela est tout simple : mais si l'on verse à la partie supérieure de l'eau froide, alors l'ébullition se manifeste à l'instant avec beaucoup de force. L'eau froide fait bouillir l'eau du ballon, parce qu'elle condense la vapeur et diminue la pression qui s'exerçait sur le liquide. On peut même se donner ainsi le spectacle d'une ébullition sans feu qui dure des heures entières.

La variation du point d'ébullition a aussi été vérifiée par des expériences directes sur les lieux élevés, dans les Alpes, dans les Pyrénées et sur d'autres montagnes.

L'eau bouillante n'est donc pas également chaude dans tous les lieux de la terre, et par conséquent elle n'est pas également propre aux usages domestiques et à la préparation des aliments. A Quito, par exemple, l'eau bout à 90°, et cette température est beaucoup trop basse pour cuire certaines substances qui peuvent être cuites à 100°.

Le tableau suivant contient les lieux habités du globe qui sont à la plus grande hauteur au-dessus du niveau de la mer, et les températures correspondantes des points d'ébullition de l'eau.

Points d'ébullition dans les lieux habités les plus élevés.

NOMS DES LIEUX.	HAUTEUR au-dessus de l'Océan.	HAUTEUR moyenne du barom.	DEGRÉ d'ébullition de l'eau.
	mèt.	mm.	deg.
Métairie d'Antisana	4101	454	86,3
Ville de Micuipampa (Pérou)	3618	483	87,9
Ville de Quito	2908	527	90,1
Ville de Caxamarca (Pérou)	2860	531	90,3
Santa-Fé de Bogota	2661	544	90,9
Ville de Cuença (province de Quito)	2633	546	91,0
Mexico	2277	572	92,3
Hospice du Saint-Gothard	2075	586	92,9
Village de Saint-Véran (Alpes Marit.)	2040	588	93,0
Village de Breuil (vallée de Mont-Cervain)	2007	591	93,1
Village de Maurin (Basses-Alpes)	1902	599	93,5
Village de Saint-Remi	1604	621	94,5
Village de Heas (Pyrénées)	1465	632	94,9
Village de Gavarnie (Pyrénées)	1444	634	95,0
Briançon	1306	645	95,5
Village de Baréges (Pyrénées)	1269	648	95,6
Palais de Saint-Ildefonse (Espagne)	1155	657	96,0
Bains du mont Dor (Auvergne)	1040	667	96,5
Pontarlier	828	685	97,1
Madrid	608	704	97,8
Inspruck	566	708	98,0
Munich	538	710	98,1
Lausanne	507	713	98,3
Augsbourg	475	716	98,4
Salzbourg	452	718	98,4
Neufchâtel	438	719	98,5
Plombières	421	721	98,5
Clermont-Ferrand (préfecture)	411	722	98,5
Genève et Freyberg	372	725	98,6
Ulm	369	726	98,7
Ratisbonne	362	726	98,7
Moscou	300	732	99,0
Gotha	285	733	99,0
Turin	230	738	99,1
Dijon	217	740	99,2
Prague	179	743	99,3
Mâcon (Saône)	168	744	99,4
Lyon (Rhône)	162	745	99,4
Cassel	158	745	99,4
Gottingue	134	747	99,5
Vienne (Danube)	133	747	99,5
Milan (Jardin botanique)	128	748	99,5
Bologne	121	749	99,5
Parme	93	751	99,6
Dresde	90	752	99,6
Paris (Observatoire royal, 1er étage)	65	754	99,7
Rome (Capitole)	46	756	99,8
Berlin	40	756	99,8

Dans un même lieu le baromètre éprouvant des variations continuelles, il en résulte que le point d'ébullition change à chaque instant. Pour Paris, les hauteurs extrêmes du baromètre observées depuis 30 ans ayant été 719^{mm} et 781^{mm}, on voit que le plus haut degré d'ébullition, correspondant à 781^{mm}, a été environ 100°,8; et le plus bas, correspondant à 719, d'environ 98°,5. Il est facile de voir comment on doit tenir compte de la hauteur du baromètre au moment où l'on marque le point d'ébullition sur l'échelle d'un thermomètre.

M. Walferdin, à qui on doit des recherches extrêmement intéressantes sur les thermomètres (voyez la *Météréologie*), a imaginé un thermomètre très-ingénieux et très-exact pour déterminer la température de l'ébullition de l'eau dans les diverses localités, et par conséquent les pressions atmosphériques correspondantes; cet appareil est représenté (FIG. 21, PL. 8). On voit que le milieu de l'échelle, au lieu d'être en tube fin, est en réservoir; ainsi le thermomètre marque quelques degrés au-dessus et au-dessous du zéro, et pareillement quelques degrés au-dessus et au-dessous du point de l'ébullition. Par cet artifice on lui donne une grande sensibilité et peu de longueur. Ce petit appareil, si portatif, semble bien plus commode que le baromètre pour voyager dans les montagnes et pour déterminer des hauteurs; mais lorsqu'on prend garde qu'un dixième de degré de différence dans le point d'ébullition correspond à environ 2 millimètres de hauteur barométrique, et que d'ailleurs les thermomètres les plus soignés restent exposés à un déplacement du zéro, on comprend que le baromètre conserve de réels avantages. Fahrenheit avait eu déjà l'idée de construire des thermomètres raccourcis en soufflant un renflement vers le milieu de la tige.

Cependant je donne ici la table dressée par M. Regnault, pour cet objet (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XIV, juin 1845); elle servira en même temps à indiquer comment se doivent faire les corrections lorsqu'on gradue des thermomètres sous des pressions qui ne sont pas de 760^{mm}.

Table des tensions de la vapeur d'eau, en millimètres, de 85 à 101 degrés.

DEGRÉS.	TENSION.	DIFFÉRENCE.	DEGRÉS.	TENSION.	DIFFÉRENCE.	DEGRÉS.	TENSION.	DIFFÉRENCE.	DEGRÉS.	TENSION.	DIFFÉRENCE.
85,0	433,04	1,71	89,0	505,76	1,94	93,0	588,41	2,20	97,0	682,03	2,49
1	4,75	1,71	1	7,70	1,95	1	590,61	2,21	1	4,52	2,50
2	6,46	1,71	2	9,65	1,95	2	2,82	2,22	2	7,02	2,51
3	8,17	1,72	3	511,60	1,96	3	5,04	2,22	3	9,53	2,51
4	9,89	1,73	4	3,56	1,97	4	7,26	2,23	4	692,04	2,52
85,5	441,62	1,73	89,5	5,53	1,97	93,5	9,49	2,23	97,5	4,56	2,52
6	3,35	1,74	6	7,50	1,98	6	601,72	2,25	6	7,08	2,53
7	5,09	1,75	7	9,48	1,98	7	3,97	2,25	7	9,61	2,54
8	6,84	1,75	8	521,46	1,99	8	6,22	2,26	8	702,15	2,55
9	8,59	1,75	9	3,45	2,00	9	8,48	2,26	9	4,70	2,56
86,0	450,34	1,76	90,0	5,45	2,00	94,0	610,74	2,27	98,0	7,26	2,56
1	2,10	1,77	1	7,45	2,01	1	3,01	2,28	1	9,82	2,57
2	3,87	1,77	2	9,46	2,02	2	5,29	2,29	2	712,39	2,58
3	5,64	1,78	3	531,48	2,02	3	7,58	2,29	3	4,97	2,59
4	7,42	1,79	4	3,50	2,03	4	9,87	2,30	4	7,56	2,59
86,5	9,21	1,79	90,5	5,53	2,04	94,5	622,17	2,31	98,5	720,15	2,60
6	461,00	1,80	6	7,57	2,04	6	4,48	2,31	6	2,75	2,60
7	2,80	1,80	7	9,61	2,05	7	6,79	2,32	7	5,35	2,61
8	4,60	1,81	8	541,66	2,06	8	9,11	2,33	8	7,96	2,62
9	6,41	1,81	9	3,72	2,06	9	631,44	2,34	9	730,58	2,63
87,0	8,22	1,82	91,0	5,78	2,07	95,0	3,78	2,34	99,0	3,21	2,64
1	470,04	1,83	1	7,85	2,07	1	6,12	2,35	1	5,85	2,65
2	1,87	1,83	2	9,92	2,08	2	8,47	2,36	2	8,50	2,66
3	3,70	1,84	3	552,00	2,09	3	640,83	2,36	3	741,16	2,67
4	5,54	1,84	4	4,09	2,10	4	3,19	2,38	4	3,83	2,67
87,5	7,38	1,85	91,5	6,19	2,10	95,5	5,57	2,38	99,5	6,50	2,68
6	9,23	1,85	6	8,29	2,10	6	7,95	2,39	6	9,18	2,69
7	481,08	1,86	7	560,39	2,12	7	650,34	2,39	7	751,87	2,70
8	2,94	1,87	8	2,51	2,12	8	2,73	2,40	8	4,57	2,71
9	4,81	1,88	9	4,63	2,13	9	5,13	2,41	9	7,28	2,72
88,0	6,69	1,88	92,0	6,76	2,13	96,0	7,54	2,41	100,0	760,00	2,73
1	8,57	1,88	1	8,89	2,14	1	9,95	2,42	1	2,73	2,73
2	490,45	1,89	2	571,03	2,15	2	662,37	2,43	2	5,46	2,74
3	2,34	1,90	3	3,18	2,16	3	4,80	2,44	3	8,20	2,75
4	4,24	1,91	4	5,34	2,16	4	7,24	2,45	4	771,95	2,76
88,5	6,15	1,91	92,5	7,50	2,17	96,5	9,69	2,46	100,5	3,71	2,77
6	8,06	1,92	6	9,67	2'17	6	672,14	2,46	6	6,48	2,78
7	9,98	1,92	7	581,84	2,18	7	4,60	2,47	7	9,26	2,78
8	501,90	1,92	8	4,02	2,19	8	7,07	2,48	8	782,04	2,79
9	3,82	1,94	9	6,21	2,20	9	9,55	2,48	9	4,83	2,80
89,0	5,76		93,0	8,41		97,0	682,03		101,0	7,63	

Lorsqu'on augmente la pression au lieu de la diminuer, on retarde l'ébullition, et on peut la retarder indéfiniment en augmentant indéfiniment la pression. C'est ainsi que dans l'appareil si connu sous le nom de *marmite à Papin* ou de *digesteur de Papin*, on peut élever l'eau jusqu'aux plus hautes tempéra-

tures sans la faire bouillir. Cet appareil (Fig. 15, Pl. 10) n'est autre chose qu'un vase cylindrique de bronze ou de fer dont les parois sont capables d'une grande résistance. L'ouverture en est petite, et on la ferme avec une soupape sur laquelle on met des poids, de manière à produire une pression de quarante ou cinquante atmosphères suivant la force des parois. L'ébullition est impossible, puisque la vapeur qui se forme au-dessus du liquide exerce une pression toujours suffisante pour l'empêcher. Mais lorsqu'on ouvre la soupape, l'eau s'élance en vapeur avec une telle impétuosité qu'elle forme un jet de huit ou dix mètres de hauteur; en même temps, le vase est fort refroidi à cause de la chaleur qu'il a dû fournir à l'eau pour sa vaporisation.

Le digesteur fut inventé par Papin, vers le milieu du XVII[e] siècle; il servit alors à une foule d'expériences curieuses : soit pour montrer la puissance mécanique de la vapeur; soit pour montrer la puissance dissolvante de l'eau, maintenue liquide à des températures plus hautes que 100°.

L'*autoclave* est un appareil de même genre que le digesteur de Papin; mais comme il est destiné à supporter seulement des pressions de 5 ou 6 atmosphères, il peut avoir de très-grandes dimensions. Ce qui le distingue, c'est son couvercle *elliptique*, placé en dedans et plus large en tous sens que l'ouverture qu'il ferme; la vapeur le presse et le fait joindre d'autant mieux que sa tension est plus grande; ainsi, l'appareil *se ferme de lui-même*. La figure 13 (Pl. 11) représente un autoclave de petites dimensions, très-commode dans les cours publics; c'est une sorte de chaudière à vapeur portative avec laquelle on peut faire toutes les expériences; pour cela on adapte successivement divers *raccords* au tube *a* par lequel s'échappe la vapeur. On s'en sert, par exemple, pour montrer comment l'eau se chauffe au moyen de la vapeur, et pourquoi il se fait alors un bruit si considérable à l'extrémité du tube.

Dans une masse liquide très-profonde, outre la pression qui s'exerce à la surface, les molécules du fond supportent encore toute la pression due à la colonne liquide supérieure. Ainsi, dans une chaudière pleine d'eau, de dix mètres de profondeur, les couches du fond supportent deux atmosphères, et par conséquent les bulles de vapeur ne peuvent s'y former, à moins que la température ne soit de 121°; c'est donc là le point d'ébullition de l'eau pour cette profondeur. Mais les couches superfi-

cielles ne pouvant être qu'à 100°, il arrive que les couches du fond s'élèvent sans cesse, à cause de leur dilatation; qu'elles forment des bulles de vapeur à cause de l'abaissement de la pression, et, par conséquent, qu'elles se refroidissent et passent successivement par toutes les températures, depuis 121° jusqu'à 100°. Dans les vases qui n'ont même que quelques décimètres de profondeur, il se produit un phénomène analogue, avant que l'ébullition commence. Les couches du fond prennent aux parois du vase assez de chaleur pour se vaporiser, de petites bulles se forment et s'élèvent; mais, en gagnant les couches supérieures qui sont encore trop froides, elles se condensent subitement. De là ce bruit singulier qui précède de quelques instants l'ébullition des liquides. On s'en assure aisément en faisant l'expérience dans des ballons de verre, car on voit les bulles se former, s'élever un peu, et disparaître tout à fait; on dit alors que le liquide *chante*, et qu'il ne tardera pas à bouillir.

Absorption. — L'expérience suivante (Fig. 16, Pl. 11) est destinée à montrer en même temps comment se fait le vide par l'ébullition, et comment la tension de la vapeur change avec la température. Avant que l'eau soit bouillante dans la cornue *a*, il se dégage des bulles à l'extrémité *d* du tube dans le vase *ef*; c'est un mélange d'air dilaté et de vapeur. Ces bulles deviennent plus grosses et plus fréquentes quand l'ébullition commence; cependant elles se dégagent encore, sans faire beaucoup de bruit et s'élèvent à la surface, parce qu'elles sont mélangées de beaucoup d'air. Après un certain temps, elles se forment encore, plus ou moins volumineuses, mais elles cessent de s'élever; on les voit disparaître à l'instant, avec le bruit sec *du marteau d'eau;* c'est un signe que l'air est complétement chassé, et que la vapeur se condense brusquement au contact de l'eau froide. Alors on retire le feu; le liquide s'élève peu à peu dans le tube *dc*, lentement et par oscillations; arrivé près du coude *c*, il oscille encore plus; puis tout à coup il s'élance en jet dans la cornue, qui se remplit en un instant du liquide qui était dans le vase *ef*.

Influence des substances dissoutes dans le liquide. — Le point d'ébullition d'un liquide n'est pas changé par des corps étrangers qui sont mécaniquement suspendus dans sa masse, comme les parcelles de sable dans l'eau; mais il est presque tou-

jours changé par les corps qui sont chimiquement combinés avec sa substance. Ainsi tout corps soluble change le point d'ébullition de son dissolvant; les résines, par exemple, retardent l'ébullition de l'alcool et de l'essence de térébenthine; les sels retardent l'ébullition de l'eau, la plupart des acides la retardent pareillement, tandis que l'alcool, au contraire, semble l'avancer, parce qu'en se dissolvant dans l'eau, il forme un composé plus volatil que l'eau, mais moins volatil que l'alcool.

M. Legrand, professeur à la Faculté des sciences de Montpellier, a fait des expériences très-intéressantes sur les dissolutions salines; le tableau suivant contient les résultats auxquels il est parvenu.

Tableau des points d'ébullition de diverses dissolutions saturées et des proportions de sel correspondantes.

DÉSIGNATION. DES DISSOLUTIONS.	POINTS d'ébullition en degrés centigrades.	QUANTITÉS de sel qui saturent 100 d'eau.
Chlorate de potasse	104°,2	61,5
Chlorure de barium	104 ,4	60,1
Carbonate de soude	104 ,6	48,5
Phosphate de soude	106 ,5	113,2
Chlorure de potassium	108 ,3	59,4
Chlorure de sodium	108 ,4	41,2
Hydrochlorate d'ammoniaque	114 ,2	88,9
Tartrate neutre de potasse	114 ,67	296,2
Nitrate de potasse	115 ,9	335,1
Chlorure de strontium	117 ,9	117,5
Nitrate de soude	121 ,0	224,8
Acétate de soude	124 ,37	209,0
Carbonate de potasse	135 ,0	205,0
Nitrate de chaux	151 ,0	362,2
Acétate de potasse	169 ,0	798,2
Chlorure de calcium	179 ,5	325,0
Nitrate d'ammoniaque	180 ,0	infini.

M. Legrand ne s'est pas borné à déterminer avec soin le point d'ébullition d'une dissolution d'eau saturée; mais il a aussi fait des expériences très-nombreuses et très-précises, afin d'obtenir les proportions de sel qui sont nécessaires pour produire des retards d'ébullition de 1°, 2°, etc., jusqu'au point de saturation.

Le tab'eau suivant est en quelque sorte un résumé de son travail.

Tableau des retards des points d'ébullition d'après les expériences de M. Legr[...] professeur d'astronomie à la Faculté de Montpellier.

Retard d'ébullition.	Nitrate d'ammoniaque cristall.	Chlorure de calcium.	Acetate de potasse.	Nitrate de chaux.	Carbonate de potasse.	Acetate de soude.	Nitrate de soude.	Chlorure de strontium.	Nitrate de potasse.	Tartrate neutre de potasse.	Sel ammoniac.	Chlorure de sodium.	Chlorure de potassium.	Phosphate de soude.	Carbonate de soude.	Chlorure de barium.
deg.																
1	10.0	10,0	10.5	15,0	13,0	9,9	9,3	16,7	12,2	26,9	7.8	7,7	9,0	23,0	14,4	15,6
2	20,5	16,5	20.0	25 3	22.5	17,6	18,7	25,2	26,4	47,2	13.9	13,4	17,1	42,8	26,7	32,5
3	31.3	21,6	28,6	34,4	31,0	23,1	28,2	32,1	42.2	65,0	19,7	18,4	24,5	60,6	36,8	44,5
4	42,4	25,8	36,4	42.6	38,8	30.5	37,9	37.9	59,6	82,3	25,2	23,1	31,4	76,8	44,7	55,6
5	53.8	29,4	43,4	50,4	46,1	36,7	47,7	43,4	78,3	100,1	30,5	27,7	37,8	91,8		
6	65,4	32,6	49.8	57,8	53,1	42,9	57,6	48,8	98.2	118,5	35,7	31,8	44,2	106,1		
7	77,3	35,6	55,8	64,9	59,6	49,3	67,7	54,0	119.0	137.3	41,3	35,8	50,5			
8	89.4	38,5	61,6	71,8	65.9	55,8	77.9	59,0	140,6	156,5	47,3	39,7	56,9			
9	101,9	41,3	67,4	78.6	71,9	62,4	88,3	63,9	163,0	176,1	53.5					
10	114,9	44,0	73.3	85.3	77,6	69,2	98,8	68,9	185.9	196,2	59,9					
11	128,4	46,8	79,3	91.9	83.0	76,2	109,5	74,1	209.2	216,8	66,4					
12	142,4	49,7	85,3	98,4	88,2	83,4	120,3	79,6	233,0	237,9	73,3					
13	156,9	52,6	91,4	101.8	93,2	90,9	131,3	85,3	257,6	259,5	80.5					
14	172,0	55,6	97,6	111,2	98,0	98,8	142,4	91,2	285,3	281,6	88,1					
15	188,0	58,6	103,9	117,5	102,8	107,1	153,7	97,5	310,2							
16	204,4	61,6	110,3	123,8	107,5	115,8	165,2	104,0	336,0							
17	221,4	64,6	116.8	130,0	112,3	125,1	176,8	110,9								
18	238,8	67,6	123,4	136,1	117,1	131,9	188,6									
19	256,8	70,6	130,1	142,1	122,0	145,2	200.5									
20	275,3	73,6	136.9	148,1	127,0	156,1	212,6									
22	314,0	79.8	150.8	160,1	137.0	179.3										
24	354,0	86,0	165,1	172,2	147,1	204.5										
26	396,0	92,2	180,1	184.5	157,3											
28	440,2	95,4	196,1	197,0	167,7											
30	487.4	101,6	213,0	209.5	178.1											
32	537,3	110,9	230,6	222,2	188.8											
34	590,0	117.2	248,7	235,1	199,6											
36	645,0	123,5	267,5	248,1												
38	705.5	129,9	287,3	261,3												
40	770,5	136,3	308,3	274,7												
42	840 6	142,8	330,8	288,1												
44	915,5	149,4	354,9	302.6												
46	995,5	156.2	380.6	317,4												
48	1081,5	163,2	407,9	335.2												
50	1173,5	170,5	436.9	351,2												
52	1273,0	178,1	467.6													
54	1383,0	186,0	500,0													
56	1504.0	194.3	534,1													
58	1637,0	203.0	569,9													
60	1775,0	212,1	607.4													
62	1923,0	221,6	646.6													
64	2084,0	231,5	687,6													
66	»	241,9	730,4													
68	»	252,8	775,0													
70	»	264 2														
72	»	276,1														
74	»	288,5														
76	»	301,4														
78	»	314,8														
80	infini.															

Rudberg avait cherché à déterminer la température de la vapeur qui s'élève d'une dissolution bouillante, et ses expériences l'avaient conduit à cette singulière conclusion : *que la vapeur ne prend jamais que la température qu'elle aurait si elle se dégageait de l'eau pure*. Mais M. Regnault, tout en vérifiant que le thermomètre ne marque en effet qu'environ 100° dans la vapeur des diverses dissolutions qui bouillent sous la pression atmosphérique, explique ce phénomène par la vapeur d'eau pure condensée qui ruisselle sans cesse sur le thermomètre, par suite de divers refroidissements extérieurs, et qui l'empêche ainsi de s'élever notablement au-dessus de 100°. (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, août 1854, pag. 311.)

Lorsqu'un liquide est combiné avec un autre liquide, plus ou moins volatil que lui, il y a encore changement dans le point d'ébullition ; mais alors la vapeur qui se forme n'est souvent qu'un mélange, en diverses proportions, des vapeurs des deux liquides. Ainsi, l'alcool avance le point d'ébullition de l'eau, l'acide sulfurique le retarde, et, dans les deux cas, les vapeurs sont simplement mélangées, quoique les liquides soient chimiquement combinés.

Influence de la cohésion du liquide et de la nature du vase. —L'eau bout un peu plus tard dans un vase de verre que dans un vase de métal, et en même temps l'ébullition se fait par soubresauts très-violents : d'autres liquides présentent des phénomènes analogues, et ces soubresauts paraissent d'autant plus violents que le liquide présente plus de cohésion et qu'il exerce sur la matière du vase une action moléculaire plus grande. Il suffit souvent de jeter dans un vase de verre un morceau de métal, ou quelques poudres métalliques, pour rendre l'ébullition très-régulière.

A ces faits, qui avaient été signalés par Gay-Lussac, un habile physicien de Genève, M. Marcet, vient d'en ajouter d'autres qui ne sont pas moins remarquables (*Biblioth. de Genève*, 1842, t. XXXVIII). M. Marcet a constaté, 1° qu'en général la température de la vapeur est moindre que celle de l'eau bouillante. Il est vrai que dans ses expériences aucune précaution particulière n'avait été prise pour empêcher le refroidissement du vase dans lequel s'élevait la vapeur ; 2° que l'eau qui bout dans un vase de verre enduit de soufre ou de gomme laque est un peu moins chaude que celle qui bout dans un vase de métal ; 3° que dans le verre ordinaire la température de l'ébullition de l'eau est d'environ 1° ou 1°,25 plus élevée que dans un vase

de métal ; 4° enfin, qu'en faisant bouillir de l'acide sulfurique dans un ballon de verre, on lui donne la propriété permanente de retarder beaucoup plus le point d'ébullition qu'il ne faisait auparavant; le retard s'élève alors à 5 ou 6°.

160. De la rapidité de l'ébullition. — La quantité de vapeur qui se forme par ébullition dépend de la quantité de chaleur que reçoit le liquide dans un temps donné, et cette quantité de chaleur dépend : 1° de l'activité du foyer ; 2° de la nature et de l'épaisseur des parois de la chaudière ; 3° de l'étendue de la surface liquide qui reçoit l'action du feu.

1° L'activité du foyer dépend de la disposition du fourneau, et surtout de la nature du combustible, car le bois, le charbon, la tourbe, la houille et l'anthracite ne donnent pas, à poids égal, la même quantité de chaleur, et ils ne sont pas non plus capables de produire la même température.

2° La surface extérieure de la chaudière peut être plus ou moins propre à recevoir l'action du feu et à absorber la chaleur qui la frappe, et il arrive aussi que la nature des parois, quand l'épaisseur est très-grande, peut avoir une influence considérable sur la quantité de chaleur qui peut les traverser dans un temps donné.

3° L'eau qui reçoit l'action du feu est celle qui touche les parois échauffées de la chaudière, et si chaque partie de ces parois fournit la même quantité de chaleur, il est évident que l'eau vaporisée dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière que peut frapper la flamme, ou à ce qu'on appelle la *surface de chauffe*.

161. État sphéroïdal. — Plusieurs liquides, mis en contact avec une surface chauffée jusqu'au rouge, présentent des phénomènes singuliers : 1° au lieu de mouiller cette surface, ils semblent l'éviter et prennent la forme globulaire que l'eau prend sur les corps gras, ou le mercure sur le verre; 2° au lieu d'entrer en ébullition violente, ils semblent à peine s'échauffer, restent en repos ou tournent sur eux-mêmes, ne diminuant de volume que très-lentement ; 3° quand la surface se refroidit, et approche de la température de 200 ou 300°, le liquide s'étale davantage, il commence à la mouiller, et tout à coup il est projeté avec violence dans toutes les directions.

Ces expériences peuvent se faire avec un creuset de métal, dans lequel on laisse tomber l'eau peu à peu avec une pipette. Mais la lampe éolipyle de M. Breuzin (Fig. 14, Pl. 11) est

bien plus commode pour montrer toute la variété de ces phénomènes. La capsule *a* mince, large et ouverte, enveloppée par la flamme, est portée au rouge en quelques instants et l'on distingue aisément toutes les formes du liquide *l*, et tous les mouvements qu'il exécute.

Il paraît certain qu'il y a une couche de vapeurs, une sorte d'atmosphère, tout autour du liquide; atmosphère qui se renouvelle sans cesse, mais qui n'en est pas moins interposée d'une manière continue entre la surface du liquide et celle du métal, empêchant ainsi le contact immédiat, le contact capillaire qui d'une part étalerait le liquide et de l'autre permettrait une transmission de chaleur incomparablement plus rapide. Dans tous les cas le liquide prend une température à peu près fixe, perdant par le rayonnement, et surtout par l'évaporation, toute la chaleur qu'il reçoit par cette imparfaite transmission.

La même cause produit le même effet dans une expérience inverse qui est connue de tout le monde et surtout des forgerons. Une barre de fer ou d'acier, chauffée au rouge blanc, et plongée subitement dans l'eau, y reste éblouissante pendant quelques instants; c'est seulement quand elle est un peu refroidie qu'elle entre en contact avec le liquide et produit ce bouillonnement tumultueux qui projette le liquide de toutes parts.

M. Boutigny a fait une foule d'expériences sur ce sujet; c'est lui qui a désigné ces phénomènes sous le nom de *caléfaction*, d'*état globulaire*, d'*état sphéroïdal*, et il a essayé d'en donner une théorie où la part qu'il faut faire à son imagination me semble beaucoup trop grande. Cependant, si ses vues théoriques ne sont pas heureuses, elles ne l'ont pas empêché, du moins, d'ajouter aux expériences connues quelques expériences intéressantes. Par exemple, il fait geler de l'eau dans un fourneau à coupelle, à côté de l'or et de l'argent en fusion; pour cela il y met une capsule, à moitié pleine d'acide sulfureux, auquel il ajoute quelques gouttes d'eau; lorsqu'on retire la capsule, l'eau est gelée. En effet, sous la pression atmosphérique l'acide sulfureux est bouillant à — 8°; c'est-à-dire que dans un vase ouvert il ne peut pas se chauffer au-dessus de — 8°, comme l'eau ne peut pas se chauffer au-dessus de 100°. Dans le fourneau, comme dans l'air, à la température ambiante l'acide sulfureux est donc à — 8°, et dans les deux cas l'eau qui le touche se gèle à l'instant.

M. Boutigny a répété cette expérience ancienne qui consiste à plonger sans se brûler le doigt, ou la main, dans un bain de plomb, de bronze ou de fonte en fusion. De même que la barre de fer rouge ne se refroidit pas immédiatement dans l'eau, le doigt ne se réchauffe pas immédiatement dans la fonte liquide; mais il faut prendre ses précautions : ne pas plonger le doigt trop brusquement et ne pas le laisser trop longtemps. L'humidité naturelle de la peau pourrait aussi être insuffisante pour fournir l'atmosphère de vapeur, il est donc prudent, avant l'expérience, de plonger le doigt dans l'eau ou dans une dissolution de sel ammoniac.

162. De l'évaporation. — L'*évaporation* est la formation de la vapeur à la surface libre des liquides, tandis que l'ébullition est, comme nous venons de le voir, la formation de la vapeur dans le sein de la masse. L'eau s'évapore à la surface des rivières, des lacs et des mers; elle s'évapore à la surface de la terre, sur le sol et sur les plantes; et il est évident qu'elle n'a pas alors une force élastique capable de vaincre la pression de l'air. Ainsi, les observations les plus communes nous font voir que la vapeur se forme sur l'eau à toutes températures, et qu'elle s'exhale dans l'air avec les plus faibles tensions. On avait d'abord présumé qu'une affinité chimique était nécessaire entre les molécules d'air et de vapeur pour que ce phénomène pût se produire; mais nous avons vu qu'il n'est nul besoin de recourir aux forces chimiques : la vapeur, quelque faible que soit sa tension, se mélange avec l'air comme deux gaz se mélangent entre eux. La seule condition pour qu'un liquide s'évapore est donc que les couches d'air qui l'environnent ne soient pas saturées de vapeur; et comme il arrive dans le mélange de deux gaz, que les molécules de l'un sont un obstacle mécanique à la diffusion des molécules de l'autre, il arrive aussi, dans l'évaporation, que l'air oppose une résistance à la diffusion de la vapeur. Ainsi, dans une atmosphère parfaitement calme, l'évaporation est lente, tandis que, dans une atmosphère agitée, elle devient de plus en plus rapide à cause que les couches non saturées sont sans cesse ramenées en contact avec le liquide. Un vent sec, animé d'une vitesse infinie, en soufflant sur la surface d'un lac, y produirait une évaporation aussi instantanée que celle qui se produirait dans un vide infini, car les molécules de vapeur seraient emportées si vite qu'elles ne pourraient exercer aucune pression sur

les molécules d'eau pour les empêcher de se vaporiser à leur tour.

La rapidité de l'évaporation n'est pas seulement dépendante de l'agitation de l'air ; elle dépend aussi de la tension de la vapeur ou plutôt de la différence qui existe entre la tension de la vapeur qui se forme et celle de la vapeur qui est déjà formée dans l'air. Il résulte des expériences de Dalton, sur ce sujet, que la quantité de liquide qui peut se vaporiser dans un temps donné est toujours proportionnelle à cette différence de tension. Ainsi, dans un air parfaitement sec, à 11° de température, il se vaporiserait, à surface égale, autant d'eau à peu près qu'il s'en pourrait vaporiser à 30° dans un air humide contenant de la vapeur à 20^{mm} de tension.

Il est à peine nécessaire de remarquer que, toutes les autres circonstances étant les mêmes, la quantité d'eau qui s'évapore dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la surface sur laquelle la vapeur prend naissance.

Les autres liquides s'évaporent à l'air libre, d'après les mêmes principes que l'eau ; on peut dire seulement que, pour eux, la rapidité de l'évaporation est proportionnelle à la tension de la vapeur ; car, en général, quand ils se vaporisent, il n'y a pas dans l'air de vapeur préexistante qui presse la surface liquide et retarde l'évaporation.

Nous verrons, dans la *Météorologie*, tous les phénomènes naturels qui résultent de la formation de la vapeur, de sa suspension dans l'atmosphère, et de sa condensation sous forme de pluie, de rosée, de gelée, etc.

Du froid produit par la vaporisation. — Quand un liquide est en ébullition à l'air libre, il conserve une température fixe, parce qu'il reçoit du foyer, par les parois du vase, autant de calorique que la vapeur en absorbe pour se former ; quand l'ébullition se fait sous le récipient de la machine pneumatique, la température s'abaisse graduellement, parce qu'alors c'est à la masse liquide et aux corps environnants que la vapeur doit prendre le calorique latent nécessaire à sa formation. Nous verrons plus loin que 1 gramme de vapeur d'eau, en se formant par ébullition ou par évaporation, absorbe une quantité de chaleur latente capable d'élever de 1° la température de 540 grammes d'eau liquide ; ainsi, on peut juger de la rapidité avec laquelle s'abaisse la température d'une masse liquide sou-

mise à une ébullition spontanée ou à une prompte évaporation. Nous indiquerons les expériences les plus frappantes qui reposent sur ce principe.

Congélation de l'eau dans le vide. — On met sous le récipient de la machine pneumatique un large vase de verre, contenant de l'acide sulfurique; à quelques centimètres au-dessus, on dispose une capsule de métal très-mince et très-évasée, contenant quelques grammes d'eau : ordinairement cette capsule est portée par trois fils ou par trois bandes de métal très-déliées, qui s'ajustent sur les bords du vase de verre. Après quelques coups de piston, l'eau entre en ébullition; en continuant de faire le vide, l'ébullition cesse, et quand le vide est fait aussi complétement que possible, on attend quelques minutes; des aiguilles de glace paraissent dans la capsule, et, bientôt après, toute l'eau qu'elle contient ne forme qu'une masse solide. Cette expérience curieuse est due à Leslie. L'acide sulfurique absorbe la vapeur d'eau à mesure qu'elle se forme, et détermine ainsi une évaporation plus prompte. Tout corps puissamment absorbant produit le même effet; la farine d'avoine, un peu torréfiée, réussit parfaitement. La capsule est très-mince, parce qu'elle doit participer au refroidissement, et on l'isole des corps voisins pour qu'elle n'en reçoive pas la chaleur (Fig. 11, Pl. 10).

Une congélation, fondée sur les mêmes principes, peut se faire plus commodément avec l'appareil de la figure 10 (Pl. 10). C'est un tube contenant un peu d'eau que l'on a fait bouillir pour y faire le vide, et que l'on a fermé ensuite; après l'avoir disposé comme le représente la figure, on verse un mélange réfrigérant dans le manchon qui enveloppe sa partie supérieure, et l'on ne tarde pas à voir la glace se former à la surface du liquide inférieur.

Congélation du mercure. — On peut pousser le refroidissement par évaporation au point de congeler le mercure. Pour cela on revêt d'une petite éponge ou de quelque tissu spongieux la boule d'un thermomètre, et on l'humecte de carbure de soufre, ou, ce qui vaut mieux encore, d'acide sulfureux liquide; l'évaporation est si rapide, et la quantité de chaleur enlevée si considérable, que la colonne de mercure se précipite à —10°, —20°, —30°, et, au bout de quelques instants, tout le mercure de la boule est congelé.

Le froid qui se fait sentir sur la main lorsqu'on y laisse

tomber quelques gouttes d'un liquide volatil, et en général le froid qu'on observe à la surface des corps humides, sont des phénomènes résultant de la même cause.

Les *alcarazas*, dont on se sert en Espagne et ailleurs pour rafraîchir l'eau et les boissons spiritueuses sont des vases poreux qui offrent à l'évaporation une grande surface humide. Le liquide intérieur s'infiltre à travers les parois; il s'évapore promptement dans un air un peu agité, et cette action se renouvelant sans cesse, le vase et le liquide qu'il contient sont maintenus par là à une température de 10, 15 ou 20° au-dessous de la température ambiante.

Par une raison semblable, les plantes doivent être en général à une température plus basse que celle de l'air, car leurs tissus extérieurs font plus ou moins l'office d'alcarazas.

La transpiration abondante, et l'exhalation qui se fait sans cesse à la surface des corps vivants, sont pareillement une cause de refroidissement : nous verrons plus loin, en parlant de la chaleur animale, que le sang des animaux à sang chaud a une température fixe, qui ne peut s'élever ni s'abaisser sans les plus graves inconvénients, et qui ne peut varier de quelques degrés sans que la mort s'ensuive. Pour l'homme, quel que soit le climat qu'il habite, cette température fixe est de 37°. Ainsi, sous la zone torride, où l'air s'élève souvent à des températures de 50°, les hommes vivent dans cette atmosphère brûlante, sans participer à sa température : l'activité de la transpiration est sans cesse proportionnée à l'énergie de la chaleur, et ces causes contraires se balancent avec tant d'harmonie, que le sang d'un nègre reste à peu près à 37° comme le sang d'un Lapon.

163. Ce que nous avons dit sur les causes qui font varier le point d'ébullition d'un liquide, montre assez combien la recherche de ce point est délicate, et combien elle exige de précautions. Cependant cette recherche est d'un grand intérêt pour la science, et je m'empresse de donner les résultats suivants, qui ont été obtenus par M. Pierre. On peut être assuré que les liquides qu'il a soumis à l'expérience étaient très-purs, et qu'il n'a négligé aucun soin dans ces déterminations difficiles.

Table des points d'ébullition de divers liquides d'après les expériences de M. Pierre.

(Voy. les mêmes substances aux articles Dilatation et Densité.)

NOMS DES LIQUIDES.	FORMULES.	POINTS d'ébullition.	PRESSIONS en millimètres.
		mm	0
1. Acétate d'oxyde d'éthyle (éther acétique d'alcool)	$C^4H^5O,C^4H^3O^3$.	74,1	766
2. Acétate d'oxyde de méthyle (éther acétique d'esprit de bois)	$C^2H^3O,C^4H^3O^3$.	59,5	761
3. Acide butyrique monohydraté	$C^8H^8O^4$.	163,0	751
4. Acide sulfureux	SO^2.	—8,0	759
5. Alcool éthylique (ordinaire)	$C^4H^6O^2$.	78,3	758
6. Alcool méthylique (esprit de bois)	$C^2H^4O^2$.	63,0	753
7. Alcool amylique (huile de pom. de terre)	$C^{10}H^{12}O^2$.	131,8	751
8. Aldéhyde	$C^4H^4O^2$.	22,0	758
9. Brome	Br.	63,0	760
10. Bromure d'éthyle (éther bromhydrique de l'alcool)	C^4H^5Br.	40,7	757
11. Bromure de méthyle (éther bromhydrique d'esprit de bois)	C^2H^3Br.	13,0	759
12. Bromure d'amyle	$C^{10}H^{11}Br$.	118,7	763
13. Bromure de silicium	SiBr	153,3	762
14. Bromure (tri) de phosphore	$PhBr^3$.	175,3	760
15. Butyrate d'oxyde d'éthyle (éther butyrique d'alcool)	$C^4H^5O,C^8H^7O^3$.	119,0	746
16. Butyrate d'oxyde de méthyle (éther butyrique d'esprit de bois)	$C^2H^3O,C^8H^7O^3$.	102,1	744
17. Chloroforme	C^2HCl^3.	63,6	773
18. Chlorure d'éthyle (éther chlorhydrique d'alcool)	C^4H^5Cl.	11,0	758
19. Chlorure d'éthyle monochloré	$C^4H^4Cl^2$.	64,8	754
20. Chlorure d'éthyle bichloré	$C^4H^3Cl^3$.	74,9	758
21. Chlorure d'amyle (éther chlorhydrique d'huile de pomme de terre)	$C^{10}H^{11}Cl$.	101,7	752
22. Chlorure (proto) de carbone	C^4Cl^4.	123,9	762
23. Chlorure (bi) de carbone	C^2Cl^4.	78,1	748
24. Chlorure (tri) de phosphore	$PhCl^3$.	78,3	751
25. Chlorure (tri) d'arsenic	$AsCl^3$.	138,8	757
26. Chlorure de silicium	SiCl.	59,0	760
27. Chlorure (bi) d'étain	$SnCl^2$.	115,4	753
28. Chlorure (bi) de titane	$TiCl^2$.	136,0	762
29. Ether sulfureux	C^4H^5O,SO^2.	160,3	769
30. Ether sulfurique	»	»	»
31. Formiate d'oxyde d'éthyle (éther formique d'alcool)	C^4H^5O,C^2HO^3.	52,9	752
32. Iodure d'éthyle (éther iodhydrique)	C^4H^5I.	70,0	762
33. Iodure de méthyle	C^2H^3I.	43,8	750
34. Liqueur des Hollandais	$C^4H^4Cl^2$.	84,9	762
35. Liqueur des Hollandais monochlorée	$C^4H^3Cl^3$.	114,2	766
36. Liqueur des Hollandais bichlorée	$C^4H^2Cl^4$.	138,6	763
37. Liqueur des Hollandais trichlorée	C^4HCl^5.	153,8	763
38. Sulfure de carbone	CS^2.	47,9	766
39. Sulfure (bi) de méthyle	$C^2H^3S^2$.	112,1	744
40. Térébène	C^5H^4.	161,0	744

CHAPITRE IV.

Chaudières à vapeur. — Machines à basse et à haute pression. — Machines locomotives.

Les applications de la vapeur sont trop étendues, et exigent, en général, des connaissances de mécanique trop élevées, pour qu'il soit possible de les comprendre d'une manière complète dans l'enseignement élémentaire de la physique. D'un autre côté, elles acquièrent chaque jour tant d'importance soit pour la science elle-même, soit pour l'industrie, qu'elles doivent essentiellement entrer pour quelque chose dans un cours d'études ordinaire : personne ne peut ignorer aujourd'hui comment la vapeur se forme dans les chaudières, comment on est parvenu à diminuer les dangers d'explosion, comment la puissance mécanique du combustible passe du foyer à la chaudière, de la chaudière au piston de la machine et du piston à la locomotive, au bateau à vapeur, aux meules des moulins, aux broches des filatures, etc. C'est ce qui m'a déterminé à faire de nouveaux efforts pour mettre à la portée des jeunes gens les principes fondamentaux de toutes ces grandes applications de la vapeur. En y consacrant un chapitre spécial, il m'a semblé nécessaire de le diviser en trois parties : le paragraphe 1er est relatif aux chaudières à vapeur et aux moyens de sûreté; le paragraphe 2, aux machines à basses et hautes pressions, le paragraphe 3 contient la description de la machine locomotive à six roues de Stephenson.

§ 1. — *Chaudières à vapeur.*

164. La construction des chaudières à vapeur s'est successivement perfectionnée, et elle se perfectionne encore tous les jours. Autrefois toutes les chaudières étaient de cuivre rouge, on a ensuite essayé la fonte, et aujourd'hui on adopte presque exclusivement la tôle de fer. La tôle se travaille aisément, elle a une grande ténacité pour résister aux pressions, et de plus, elle ne s'altère pas trop rapidement au contact de l'eau et du feu.

La forme des chaudières a varié de mille façons, et l'on ne s'en

étonne pas, lorsque l'on réfléchit à toutes les conditions qu'il y a à remplir : on conçoit en effet qu'il ne suffit pas qu'une chaudière ait assez de surface de chauffe pour produire la vapeur de 20 chevaux ou de 100 chevaux de force, qu'il ne suffit pas même qu'elle produise cette quantité de vapeur avec économie de combustible quand elle est neuve. Il faut de plus qu'elle soit facile à nettoyer en dedans et en dehors : en dedans, pour empêcher les dépôts calcaires, qui deviendraient une cause de destruction et d'explosion ; en dehors, pour que les dépôts de suie n'empêchent pas le contact de la flamme et le passage de la chaleur. Il faut qu'elle résiste à la corrosion du feu et de l'eau, ainsi qu'aux effets de dilatation et de contraction, qu'elle soit facile à réparer dans tous ses points ; il faut qu'elle n'occupe qu'un petit espace, et quand elle n'est pas destinée aux machines fixes, mais à la navigation ou aux chemins de fer, il faut qu'elle ait assez d'eau, qu'elle donne assez de vapeur, et que cependant elle ne devienne pas une masse trop pesante. Enfin, après toutes ces conditions générales qu'elle doit remplir, il faut qu'elle ne soit ni chère à établir, ni chère à entretenir, et qu'elle utilise le combustible le mieux possible.

Nous ne pouvons pas faire connaître ici les chaudières de toutes les formes, mais nous allons décrire la *chaudière à bouilleurs*, qui est généralement adoptée pour les machines fixes, et une chaudière tubulaire adoptée avec avantage dans la marine.

Chaudière à bouilleurs. — Cette chaudière est représentée en coupe transversale et en coupe longitudinale dans les figures 1 et 2 de la planche 12 ; elle se compose du corps de la chaudière *a*, qui est un long cylindre terminé par deux calottes hémisphériques, et des deux bouilleurs *b*, *b'*, dont les extrémités antérieures reposent sur les briques du fourneau ; chaque bouilleur communique avec le corps de la chaudière par deux ou trois larges tubulures *c* ; ici il y en a trois, parce que la chaudière a près de 6 mètres de longueur.

L'eau remplit complétement les bouilleurs, et son niveau doit être maintenu vers le milieu de la hauteur de la chaudière, ce dont on s'assure par le tube de niveau *d* (Fig. 2), auquel aboutissent deux tubes horizontaux, l'un en haut qui communique avec la vapeur, l'autre en bas qui communique avec l'eau.

La vapeur formée s'échappe par le gros tube *e*, que l'on garantit contre le refroidissement par des enveloppes non conduc-

trices, surtout lorsqu'il doit porter la vapeur à une distance un peu grande.

L'eau d'alimentation, poussée par la pompe alimentaire, arrive par le tube f, qui ne doit pas déboucher dans la vapeur elle-même, mais pénétrer dans l'eau près du fond de la chaudière, pour ne pas détruire par la condensation la vapeur déjà formée.

Voici maintenant le mouvement de la flamme. Le combustible est jeté sur la grille g, par la porte h, qui ne s'ouvre qu'au moment de la charge ; l'air arrive par le cendrier i, passe entre les barreaux de la grille, circule au travers de la masse du charbon et détermine partout une active combustion ; la flamme, plus ou moins longue suivant la nature du combustible, s'engage dans le conduit k sous les bouilleurs, qui reçoivent ainsi le premier coup de feu ; elle se replie contre la voûte l, prend le conduit intérieur m, parce que l'intervalle des tubulures de chaque bouilleur est fermé avec des briques, chauffe ainsi la partie supérieure des bouilleurs et le fond même de la chaudière ; revenue vers l'extrémité antérieure de la chaudière a, elle se sépare là en deux parties, l'une qui prend à droite le conduit extérieur n (Fig. 1), et l'autre qui prend à gauche le conduit extérieur n' (Fig. 2) ; c'est ainsi que les parois latérales de la chaudière sont elles-mêmes chauffées dans toute la hauteur qui est au-dessous du niveau de l'eau ; enfin arrivée à l'extrémité de la chaudière, la flamme passe dans la cheminée, où elle est appelée par le *tirage*. Le registre o sert à régler l'activité de la combustion.

La vapeur accumulée au-dessus de l'eau dans la *chambre à vapeur*, c'est-à-dire dans tout l'espace de la chaudière a où il n'y a pas d'eau, empêcherait l'ébullition si elle avait toujours une tension égale à celle de la vapeur qui tend à se former ; mais au moment où la vapeur s'échappe avec rapidité, pour aller dans le corps de la machine agir sur le piston, il arrive nécessairement que la pression diminue dans la chambre à vapeur ; c'est alors qu'il se fait une sorte de bouillonnement plus ou moins considérable. Aussitôt que la pression est un peu diminuée, l'eau des bouilleurs entre en ébullition, la vapeur formée gagne les tubulures, traverse la masse d'eau de la chaudière, et vient dans la chambre à vapeur prendre la place de celle qui est sortie. Par conséquent si la pression était subitement diminuée dans une proportion un peu considérable, l'énorme volume de vapeur qui tendrait à se former instantanément soulèverait

toute la masse d'eau et pourrait la projeter dans le tube de sortie, et par suite dans les cylindres de la machine. On dit alors que l'eau *prime* ou qu'elle *mousse*. On évite cet inconvénient en faisant la chambre à vapeur suffisamment grande. Si, par exemple, le cylindre de la machine a 1 mètre cube de capacité et que le piston le parcoure en 1′, c'est un mètre cube de vapeur que la chambre à vapeur doit fournir périodiquement. Or, si elle n'avait elle-même qu'un mètre cube de grandeur, elle ne pourrait pas alimenter le cylindre sans qu'il se produisît une grande diminution de pression chaque fois que le piston passerait au milieu de sa course; car c'est là le point où il a sa plus grande vitesse. C'est pourquoi on donne à la chambre à vapeur une capacité qui est 15 ou 20 fois plus grande que la capacité du cylindre.

Il importe aussi que les tubulures des bouilleurs soient assez larges pour que la vapeur en sorte librement, et que l'eau vienne à l'instant en prendre la place. J'ai reconnu par l'expérience que la vapeur ne monte dans l'eau que très-lentement; elle parcourt à peine un tiers de mètre par seconde. On peut prendre une idée de ce mouvement ascensionnel avec un tube de verre d'environ 1 décimètre de largeur et 2 mètres de hauteur (Fig. 7, Pl. 11), qui est vissé par sa garniture sur un réservoir à air comprimé; lorsqu'on ouvre le robinet *r*, la bulle d'air, grosse ou petite, qui s'élève est très-analogue à un bouillon de vapeur. Par conséquent si la somme des sections des tubulures était de 1 mètre, elles ne pourraient donner issue qu'à un tiers de mètre cube par seconde, et si, par sa surface de chauffe, le bouilleur en pouvait produire davantage, les tubulures resteraient pleines de vapeur, l'eau ne descendrait plus, le bouilleur se viderait de l'eau qu'il contient; il ne tarderait pas à rougir, et lorsque, par cessation de travail ou par quelque autre cause, l'eau retomberait dans le bouilleur ainsi *surchauffé*, il y aurait à coup sûr explosion. Il est donc nécessaire de proportionner la section des tubulures à la surface de chauffe des bouilleurs.

Il y aurait un danger pareil d'explosion si le niveau de l'eau baissait dans la chaudière au-dessous de la ligne supérieure des carneaux de chauffe de la paroi latérale (Fig. 2). Lorsqu'on rétablirait le niveau par une alimentation plus active, les parois surchauffées pourraient donner instantanément une trop grande masse de vapeur.

Enfin, lorsque l'eau se vaporise, les sels qu'elle contient se

précipitent : tantôt les molécules solides s'agrégent entre elles de manière à former seulement une espèce de boue peu résistante, tantôt elles s'attachent aux parois des chaudières et forment alors des *incrustations* plus ou moins dures qui assez souvent font feu sous le marteau. Dans quelques chaudières mal soignées on a vu ces incrustations arriver à plusieurs centimètres d'épaisseur, et former ainsi une véritable chaudière de pierre dans la chaudière métallique. Alors la chaleur passe mal, la chaudière est insuffisante pour son service, on force le feu, le métal rougit, et s'il arrive que l'incrustation se fendille et se détache, l'eau se trouve encore en contact avec une surface surchauffée, et l'explosion est imminente.

La *surchauffe accidentelle* des parois est donc fort à craindre dans les chaudières à vapeur, soit qu'elle résulte d'une *mauvaise circulation* d'eau, d'un *abaissement du niveau* ou d'une *incrustation*. C'est la cause d'explosion la plus redoutable.

Il y a cependant une seconde cause d'explosion, c'est la *surchauffe générale*, ou celle qui résulte d'un accroissement lent et progressif de température dans toute la masse du liquide, lorsque le feu est trop actif ou lorsqu'il se forme plus de vapeur qu'il ne s'en dépense. Alors il y a bientôt partout un excès de pression, auquel peuvent céder les parties faibles de la chaudière, soit que leur faiblesse résulte d'un vice de construction ou d'ajustement, soit qu'elle résulte de l'usure, de l'oxydation, etc.

165. Appareils de sûreté.—Le thermomètre, le manomètre et la soupape de sûreté sont les moyens de sûreté que l'on oppose à la seconde cause d'explosion.

Le *thermomètre*, en indiquant la température, apprend aussi quelle est la tension de la vapeur, parce que, sur l'échelle des degrés, on écrit en même temps les pressions en atmosphères, conformément au tableau de la page 286. Pour cette raison, on l'appelle quelquefois *thermo-manomètre*. Il faut avoir soin de ne pas exposer directement le réservoir du thermomètre au contact de l'eau ou de la vapeur, qui corrodent le cristal à une température élevée. On le place dans un tube fermé qui lui communique sa chaleur.

Le *manomètre* fait connaître directement la pression de la vapeur. On emploie deux sortes de manomètres, le *manomètre à air libre* et le *manomètre à air comprimé*.

Manomètre à air libre. — Cet appareil est représenté dans les figures 6 et 7 (Pl. 12). La vapeur arrive sur le mercure de la cuvette *a*, ou plutôt elle agit sur la colonne d'eau qui remplit la cuvette et le tube de communication; son effort fait monter le mercure dans le tube de fer *b* (Fig. 6). Au-dessus de ce tube est une poulie très-mobile *c*, sur laquelle passe un fil portant d'un côté un flotteur de fer *f*, qui repose sur le mercure, et de l'autre un contre-poids *p*, un peu moins pesant que le flotteur. Lorsque le mercure monte, il pousse le flotteur et le contre-poids descend; lorsqu'au contraire le mercure descend, le contre-poids monte, parce que le flotteur, en partie dégagé du mercure, devient assez lourd pour l'entraîner. Avec un tube vertical *b*, de 1, 2, 3 ou 4 fois 76 centimètres de hauteur, on peut donc mesurer 1, 2, 3 ou 4 atmosphères. Ces nombres s'écrivent sur l'échelle du contre-poids, comme l'indique la figure; seulement dans cette graduation il faut tenir compte de la hauteur verticale de la colonne d'eau, qui par elle-même pèse sur le mercure de la cuvette. Cet appareil a quelques inconvénients; pour que le flotteur joue bien, il faut employer un tube très-large et par conséquent une grande masse de mercure qui coûte cher. Au lieu d'un tube de fer on peut employer un tube de verre; alors il n'est plus besoin ni de poulie ni de flotteur, on lit la pression sur le tube lui-même; mais les tubes de verre sont fragiles, et s'ils n'ont pas une certaine largeur le mercure les crasse promptement.

Le manomètre à air libre le plus usuel est celui qui est représenté dans la figure 7; il est moins sensible que le précédent; mais lorsqu'il s'agit de pression de 5 ou 6 atmosphères, il n'y a ici nul besoin d'en connaître la valeur à 1 centimètre près, c'est-à-dire à $\frac{1}{400}$ ou à $\frac{1}{500}$ de leur valeur. Il se compose d'un tube de fer à deux branches *bcb'*, dont la longueur est égale à autant de fois 76 centimètres qu'il y a d'atmosphères dans la pression *maximum* que l'on veut mesurer. A la branche *b*, qui est un peu plus longue que l'autre, s'adapte une cuvette de fonte *a* destinée à recevoir de l'eau; à la branche *b'* s'adapte un tube de verre *d* qui est le tube *indicateur* des pressions; sa section est quatre ou cinq fois plus grande que la section du tube de fer. Cet appareil s'enterre dans le sol, de manière que le haut de la branche *b* soit à peu près au niveau de l'eau dans la chaudière, et au moyen du tube à robinet *t*, qui tient à la cuvette *a*, il se met en com-

munication soit avec la vapeur, soit avec l'eau elle-même. Le tube *ef*, qui part du sommet de l'indicateur, est destiné à conduire dans le réservoir ouvert *g* le mercure qui, en cas d'excès de pression, pourrait être projeté au dehors de l'indicateur.

Pour graduer ce manomètre, on verse d'abord du mercure par la cuvette *a*, de manière à remplir tout le tube de fer et la partie inférieure du tube de verre, jusqu'à la ligne de niveau nn'. Alors, si la branche *b* du tube de fer est d'un calibre bien uniforme, ainsi que le tube de verre, il suffit de connaître le rapport *s* de la section du second, par rapport à celle du premier, pour écrire la graduation. En effet, supposons que la cuvette *a* soit mise en communication avec un réservoir d'eau sur lequel s'exerce, au moyen d'un fluide élastique, une pression d'un nombre *p* d'atmosphères; soit *h* la hauteur constante du niveau du réservoir au-dessus de la ligne nn'; le mercure va descendre au-dessous de *n* dans la branche *b*, et monter au-dessus de n' dans le tube indicateur *d*; soit *z* la hauteur en centimètres dont il s'élève ici; puisque la section de l'indicateur est *s* fois celle du tube de fer, il sera descendu de sz dans le tube de fer; la différence des niveaux de mercure est donc $z+sz$; cette différence exprime la pression qui s'exerce sur le sommet de la colonne de mercure dans le tube *b*, en sus de la pression atmosphérique qui pèse sur l'indicateur lui-même; si l'on en retranche la pression de l'eau, on aura évidemment celle du fluide élastique qui agit dans le réservoir sur la surface du liquide. Or, la colonne d'eau avait primitivement une hauteur *h* au-dessus de la ligne de niveau nn'; de plus, elle est descendue comme le mercure de sz au-dessous de cette ligne; sa hauteur totale est donc $h+sz$. Il faut la transformer en colonne de mercure, et pour cela la diviser par la densité *d* du mercure par rapport à l'eau, ce qui donne

$$z+sz-\frac{h+sz}{d},$$

pour la pression du fluide élastique en sus de la pression atmosphérique. Mais cette pression que nous avons représentée par *p* atmosphères n'est que de $p-1$ atmosphères au-dessus de la pression atmosphérique; en la multipliant par 76, on la transforme en centimètres de mercure, et l'on a enfin

$$z+sz-\left(\frac{h+sz}{d}\right)=(p-1)76,$$

d'où l'on tire

$$z = \frac{(p-1)76d+h}{d+s(d-1)}.$$

h et d étant connus, il suffira de faire dans cette formule $p=1$, $\frac{5}{4}$, $\frac{6}{4}$, $\frac{7}{4}$, etc., pour avoir, à partir de n', le nombre des centimètres vis-à-vis lesquels il faudra écrire sur l'échelle 1 atmosphère, 1 $\frac{1}{4}$, 1 $\frac{1}{2}$, 1 $\frac{3}{4}$, etc.

On voit qu'en mettant, comme nous l'avons indiqué, la ligne de niveau nn' à la hauteur du niveau de l'eau dans la chaudière, on a $h=0$, et la formule se simplifie. Les valeurs de z deviennent proportionnelles aux pressions.

Au lieu d'employer cette *graduation théorique*, dont il est difficile d'avoir les éléments exacts, il est en général plus sûr d'avoir recours à une *graduation pratique*, à laquelle on arrive de la manière suivante : on se sert d'une pompe foulante, dont le tube de refoulement est mis en communication, d'une part, avec la cuvette a du manomètre à graduer, et de l'autre avec un bon manomètre à air libre et à tube de cristal; en faisant agir la pompe, les deux manomètres montent ensemble, et l'on rapporte sur le premier les pressions indiquées par le second.

Ces appareils sont exécutés avec soin par M. Desbordes, comme tout ce qui tient aux moyens de sûreté des chaudières à vapeur.

Manomètre à air comprimé. — Ce manomètre est représenté dans la figure 10; il se compose d'un tube droit de cristal t, fermé à son extrémité supérieure, et plongeant par son extrémité inférieure dans un petit godet de verre v, rempli de mercure : ce godet repose dans un cylindre de bronze plus large que lui, et le tube de verre est solidement fixé à la partie supérieure de ce cylindre. La vapeur, ou plutôt l'eau de la chaudière, pénètre par le robinet r; elle passe autour du godet de verre, et vient exercer sa pression sur le mercure, pour le faire monter dans le tube en comprimant l'air qui s'y trouve. Ces appareils peuvent aussi être gradués pratiquement et théoriquement : dans le premier cas, on procède comme nous venons de le dire pour le manomètre à air libre; dans le second cas, il est nécessaire de choisir des tubes d'un diamètre intérieur bien égal; alors le volume de l'air est proportionnel à la longueur qu'il occupe dans le tube. En supposant, par exemple, que le

tube soit plein d'air sous la pression atmosphérique au moment où on le plonge dans la cuvette, cet air sera évidemment sous 2 atmosphères quand il n'occupera plus que la moitié de la longueur du tube, sous 3 atmosphères quand il n'en occupera plus que le tiers, etc. Mais les pressions qui s'exercent sur la cuvette du manomètre sont plus grandes que celles qui sont supportées par l'air; elles les surpassent de toute la hauteur de la colonne de mercure soulevée dans le tube. On néglige habituellement cette correction, qui est en effet peu sensible quand le tube manométrique est court; mais l'on retombe alors dans un autre inconvénient : c'est qu'il n'y a plus qu'une petite différence de hauteur entre les nombres qui expriment les pressions de 4, de 5 ou de 6 atmosphères. Si l'on donne seulement 76 centimètres de hauteur au tube manométrique, quand le mercure monte à la moitié de la hauteur, l'air de l'appareil a une pression de 2 atmosphères, tandis que sur la cuvette il y a une pression de 2 atmosphères et $\frac{1}{2}$, puisqu'elle est égale à celle de l'air, plus les 38 centimètres de colonne de mercure soulevée, qui correspondent à $\frac{1}{2}$ atmosphère.

La graduation pratique a donc de réels avantages sur la graduation théorique; elle permet d'employer des tubes plus longs et plus sensibles; elle n'exige pas qu'ils soient cylindriques; on peut même, à dessein, les choisir plus ou moins coniques et rétrécis vers le haut, afin de donner encore plus de sensibilité à l'appareil pour les hautes pressions.

Cependant, comme exemple de calcul, je donne ici la formule de graduation théorique des manomètres cylindriques :

$$n = \frac{(rp+1) - \sqrt{(rp-1)^2 + 4r}}{2}.$$

p est le nombre des atmosphères que supporte la cuvette.

r est égal à 76 divisé par l, l étant la longueur entière du tube.

n est le rapport qui existe entre la longueur de la colonne de mercure soulevée dans le tube et la longueur entière du tube, en sorte que $n = \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}$, etc., quand le volume de l'air est réduit à moitié, à un tiers, à un quart, etc.

En donnant à p successivement les valeurs 1, 2, 3, etc., les valeurs de n indiqueront les hauteurs auxquelles il faut écrire sur l'échelle, 1 atmosphère, 2 atmosphères, etc.

Le manomètre précédent *à tube droit* présente un grave inconvénient : si, quand on cesse le feu, le chauffeur oublie de fermer le robinet *r*, le tube perd infailliblement une grande partie de l'air qu'il contient; en effet, à mesure que la chaudière se refroidit, la tension de la vapeur diminue : à 100° elle n'est plus que de 1 atmosphère; au-dessous de 100°, le vide commence à se faire, et il se fait de plus en plus, en sorte qu'à 30° on peut dire que le vide existe au-dessus de l'eau de la chaudière, puisque la vapeur n'y a plus qu'une tension de 30 millimètres. L'air du manomètre, en vertu de son excès d'élasticité, refoule le mercure du godet, et s'échappe dans le cylindre de bronze, en se mêlant à l'eau qu'il contient; ainsi les divisions de l'échelle n'ont plus leur valeur, et l'appareil est hors de service.

Le *manomètre à deux branches*, de la figure 4, est à l'abri des accidents de cette espèce. Chaque branche *t* et *t'* porte un renflement *b* et *b'*, et de plus on donne au coude *bcb'* une longueur suffisante. On le gradue en le disposant d'abord pour que la ligne *nn'* soit la ligne du niveau du mercure quand l'appareil est à l'air libre sous la pression atmosphérique, et l'on écrit 1 sur l'échelle verticale des pressions à l'endroit où elle coupe cette ligne de niveau ; puis la graduation se fait pratiquement ou théoriquement, comme nous l'avons indiqué plus haut pour le manomètre à tube droit.

Quand le vide se fait dans la chaudière, l'air vient se loger dans la boule *b*, et le mercure monte au-dessus de *n'* dans la branche *t'* qui doit avoir une hauteur suffisante pour le recevoir. Si, par exemple, la capacité de la boule *b* est triple de celle du tube *t* prise à partir du point *n*, l'air n'a plus qu'un quart d'atmosphère quand la boule *b* en est remplie, et en supposant même que le vide fût complétement fait au-dessus de la branche *t'*, on voit que le mercure ne prendrait au-dessus de *nn'*, dans la branche *t'*, qu'une hauteur de $\frac{76}{4} = 19$ centimètres.

Les boules *b* et *b'* ne sont pas même nécessaires, car en supposant que les deux branches *t* et *t'* soient partout cylindriques et qu'elles aient l'une et l'autre le même diamètre, il est facile de calculer la *dépression z* que le mercure de la branche *t* doit éprouver au-dessous du point *n*, lorsqu'on fait le vide dans la branche *t'*, ou, en général, lorsqu'on réduit à une fraction

d'atmosphère exprimée par 76 p la pression qui s'exerce dans cette branche sur le sommet de la colonne de mercure. On a ainsi

$$\frac{l+z}{l}=\frac{38}{38p+z};$$

d'où l'on tire

$$z=-\frac{(l+38p)+\sqrt{(l-38p)^2+4.38.l}}{2};$$

l étant la longueur du tube t au-dessus du point n; l et z sont exprimés en centimètres. Pour $p=0$,

$$z=-\frac{l}{2}\left(1-\sqrt{1+4.\frac{38}{l}}\right).$$

En prenant, par exemple, $l=76$ centimètres, on trouve $z=27,8$, en supprimant les boules b et b'; il suffirait donc que la longueur du coude ncn', au-dessous de la ligne de niveau, fût de 28 à 30 centimètres, pour que l'air de l'appareil ne pût pas sortir, même quand on ferait le vide au-dessus de la branche t'.

Manomètre de Bourdon. — Un tube de métal mince et élastique, ayant 1 centimètre de diamètre, est aplati au laminoir ou autrement, sa section devient, par exemple, une ellipse plus ou moins allongée; ensuite on le courbe en cercle, les deux bouts étant près de se toucher. Lorsqu'il a pris cette forme, les deux extrémités ayant été fermées et l'une d'elles fixée, on comprime un liquide dans son intérieur et l'on demande quel sera l'effet de cette pression. Tout le monde comprend que le cercle va s'ouvrir, l'extrémité libre s'écartant de l'extrémité fixe; que ce mouvement augmentera avec la pression, et que si la matière du tube n'est pas poussée hors des limites de son élasticité, elle reprendra exactement sa forme quand la pression sera ramenée au même point. En partant de cette première idée, M. Bourdon est parvenu à travailler des tubes qui conservent leur élasticité avec une exactitude surprenante, malgré les alternatives de chaud et de froid, et malgré les variations de pressions fortes ou faibles qu'ils ont subies pendant des années entières. C'est ainsi qu'il a construit, pour les chaudières à vapeur, et surtout pour les locomotives, des manomètres qui ont un véritable succès. Les figures 5, 6 (Pl. 11) représentent un de ces appareils : abc est le tube, dont on voit la section en s (Fig. 6); les mou-

vements de l'extrémité mobile *c* sont amplifiés par un levier, et marqués sur un cadran par l'aiguille *gh*.

Ces manomètres se graduent au moyen d'un manomètre à air libre.

Celui que nous représentons ici vu de face et en coupe est le manomètre des locomotives tel qu'il est adapté aux chaudières; il est à l'abri de la plupart des accidents que l'on a à redouter avec le mercure et les tubes de verre.

Soupape de sûreté. — Nous avons déjà fait connaître (83) la disposition générale des soupapes qui servent, par leur charge, à mesurer les pressions que l'on exerce sur les liquides ou les fluides élastiques. La soupape de sûreté n'est pas seulement propre à indiquer la pression de la vapeur, comme le fait un manomètre, mais elle est surtout destinée à se soulever quand la tension arrive à une certaine limite, et à donner issue à toute la vapeur qui se peut former dans ces circonstances, afin d'éviter tout excès de tension par accumulation de vapeur nouvelle. Il y a donc cette différence entre le manomètre et la soupape de sûreté : le manomètre ne fait que signaler le danger; la soupape de sûreté est destinée à le prévenir et à en faire disparaître la cause.

Il en résulte que la section de la soupape de sûreté doit dépendre de l'étendue de la surface de chauffe, et qu'elle doit lui être proportionnelle, car une surface de chauffe double, produisant dans le même temps et sous les mêmes conditions une quantité de vapeur double, il faut une section double pour lui donner une issue lorsqu'elle a à la fois la même densité et la même pression. Nous avons vu, chapitre IX, livre I^{er}, que les lois de l'écoulement des fluides élastiques ne sont qu'imparfaitement connues lorsqu'il s'agit de différences de pressions considérables; il était donc nécessaire de faire des expériences directes sur la vitesse d'écoulement de la vapeur, dans les diverses conditions que peuvent présenter les chaudières. Ces expériences ont été faites par les soins de l'autorité; les détails n'en sont point publiés, mais les résultats ont servi de base aux prescriptions qui sont contenues dans les ordonnances relatives aux machines à vapeur (ordonnance du 22 mai 1843). C'est ainsi que l'on exige, pour 1 mètre de surface de chauffe, que les soupapes aient les dimensions suivantes, à raison des pressions :

Pressions en atmosph.	2;	3;	4;	5;	6
Diamèt. des soupapes en centimètres...	2^c,063;	1^c,616;	1^c,372;	1^c,214;	1^c,100.

Ces dimensions une fois données pour 1 mètre de surface de chauffe, il est facile de trouver celles qui correspondent à une surface de 10, 20 ou 25 mètres. Pour 25 mètres, par exemple, les diamètres des soupapes devront être 5 fois plus grands, puisque les sections sont comme les carrés des diamètres. Pour 2 atmosphères, le diamètre de la soupape serait donc 10^{c},315, c'est-à-dire 10 centimètres et $\frac{1}{3}$; pour 6 atmosphères, seulement 5 centimètres et $\frac{1}{2}$, etc.

On pourrait croire que ces déterminations sont peu nécessaires et qu'il n'y aurait aucun danger à mettre partout des soupapes très-larges; mais il faut considérer que si l'on mettait sur une chaudière une soupape d'un trop grand diamètre, au moment où elle s'ouvrirait par un excès de pression, le liquide ne pourrait manquer de s'élancer de toutes parts contre les parois de la chaudière, et de produire peut-être, par sa force vive, les accidents que l'on veut éviter. En effet, si l'eau de la chaudière est, par exemple, à 153°, et que l'ouverture de la soupape réduise subitement la pression de 5 atmosphères à 2 ou 3 atmosphères, il n'y aurait pas une simple ébullition, mais une projection violente du liquide dans toutes les directions : c'est un vrai coup de bélier qui viendrait frapper les parois et peut-être les briser. Il est donc indispensable de modérer les sections des soupapes, et de les faire assez grandes pour donner issue à la vapeur, mais assez petites pour ne pas réduire trop brusquement la pression.

La forme de la soupape n'est pas elle-même indifférente; il importe qu'il n'y ait pas d'incertitude à l'égard de la section sur laquelle se fait sentir la pression de la vapeur; et le seul moyen d'éviter cette incertitude est de réduire autant qu'il est possible la surface du contact de la soupape avec son boisseau. La forme prescrite dans l'ordonnance rappelée plus haut paraît atteindre ce but; elle est représentée dans la figure 3. On voit que la surface de la soupape qui reçoit la pression est plane dans toute son étendue, et qu'elle porte sur un espace annulaire d'une petite largeur qui forme le sommet du boisseau ou de la pièce fixe; cet espace n'a qu'une largeur de 2 millimètres pour les soupapes qui ont plus de 6 centimètres de diamètre, et il se réduit au tiers, c'est-à-dire 67 centièmes de millimètre, pour une soupape de 2 centimètres de diamètre. Quant à la disposition du levier qui porte le poids de pression, il faut remarquer qu'il

tourne autour d'un axe qui est juste sur la même ligne horizontale que la tête de la soupape. Par là, le poids qui agit à l'extrémité du levier a toute son efficacité. S'il s'agit, par exemple, d'une chaudière de 30 mètres carrés de surface de chauffe, marchant à 6 atmosphères, le diamètre de la soupape doit être de 6 centimètres; sa surface de $28^{c.c},26$; il faut ajouter sur la soupape un poids équivalant à 5 atmosphères, puisque l'air fait déjà 1 atmosphère; c'est donc $5 \times 1^{k},033 = 5^{k},165$ par centimètre carré, ou 141 kilogrammes pour les $28^{c.c},26$; la tête de la soupape étant, par exemple, à un décimètre du point fixe, et le point de pression du poids à 5 décimètres, c'est donc $28^{k},5$ qu'il faut mettre sur la soupape, après en avoir soustrait le poids de la soupape elle-même.

Quand l'excès de tension a soulevé le levier, la soupape sort de l'orifice, et la vapeur s'échappe librement.

Les trois moyens de sûreté dont nous venons de parler, le thermomètre, le manomètre et la soupape de sûreté, peuvent être efficaces contre la seconde cause d'explosion, c'est-à-dire la surchauffe générale de toute la masse d'eau de la chaudière; cependant ils n'offrent pas des garanties certaines, parce que la chaudière peut avoir des vices de construction; elle peut en quelques points s'affaiblir par l'usage, et devenir incapable d'opposer à la vapeur une résistance suffisante. Il n'est même pas impossible que, dans des circonstances données et par des propriétés de l'eau et de la vapeur encore trop peu connues, une chaudière en bon état fasse explosion par surchauffe générale, malgré ces appareils.

Quant à la première cause d'explosion, elle agit d'une manière si subite qu'il n'y a qu'un moyen d'en empêcher l'effet : c'est de la prévenir, c'est de prendre assez bien ses précautions pour que la surchauffe accidentelle des parois soit impossible.

On prévient la mauvaise circulation d'eau et de vapeur par une bonne forme de chaudière et une bonne construction.

On prévient les incrustations de diverses manières :

1° En faisant l'alimentation de la chaudière avec de l'eau distillée. On a imaginé pour cela des condenseurs tubulaires, qui sont de vrais appareils de distillation; en sortant de la machine, la vapeur vient dans ces tubes mêmes, qui sont enveloppés d'eau froide; elle s'y condense, et l'eau qui en résulte est reprise par la pompe alimentaire, pour être renvoyée dans la chaudière.

Digitized by Google

C'est ainsi la même eau qui sert toujours; on supplée aux pertes par un appareil particulier. M. Beslay a beaucoup perfectionné ces sortes de condenseurs; il y a des localités où les eaux sont si mauvaises qu'il y aurait de grands avantages à les employer.

2° En jetant dans la chaudière, tantôt des pommes de terre, tantôt une argile assez fine, la présence de ces corps étrangers empêche l'agrégation des dépôts, qui ne forment alors qu'une espèce de boue, dont on débarrasse la chaudière de temps à autre. Il y a des chaudières qui n'exigent rien de tout cela ; alimentées avec des eaux assez bonnes, il suffit simplement de les nettoyer avec soin toutes les semaines.

3° Dans les chaudières qui s'alimentent à l'eau de mer, on fait ce qu'on appelle l'*extraction*, c'est-à-dire que, d'heure en heure, et quelquefois plus souvent, on retire des eaux saturées, et l'on fait une alimentation plus abondante. On calcule cette opération pour que l'eau de la chaudière ne soit jamais sursaturée; ce qui est facile lorsqu'on connaît le poids de vapeur que l'on dépense, et les proportions de sels qu'il faut pour saturer l'eau à la température qu'elle a dans la chaudière.

Enfin l'on prévient l'abaissement du niveau par les moyens suivants :

1° Par le tube de niveau, dont nous avons déjà parlé, et qui, malgré quelques oscillations, indique suffisamment le niveau de l'eau dans la chaudière. La figure 16 (Pl. 12) indique son ajustement. S'il vient à casser, le chauffeur soulève la manette *m*, et par ce mouvement ferme les deux robinets *a* et *b* par lesquels s'échapperaient la vapeur et l'eau ; alors il a toute liberté pour remettre un autre tube, qu'il engage par le fond, après avoir ôté le bouchon *e*; ce nouveau tube mis en place, on serre les écrous *c* et *d* des deux boîtes à étoupes et l'opération est finie, on peut rouvrir les robinets *a* et *b*.

2° Par deux robinets, placés sous la main du chauffeur, l'un un peu au-dessus du niveau normal, l'autre un peu au-dessous ; en ouvrant de temps à autre ces robinets, le chauffeur juge de l'état de sa chaudière : si le premier donne de l'eau, le niveau est trop élevé; si le second donne de la vapeur, le niveau est trop bas.

3° Par le *flotteur indicateur* de M. Chaussenot aîné. Cet appareil se compose d'une boule creuse de métal, attachée, comme l'indique la figure 2 (Pl. 12), à un fléau courbe tenu entre

deux pointes au support fixe q, et oscillant très-librement; le contre-poids p' équilibre en partie le flotteur. Un fil fin de métal, rr, lié au flotteur p, traverse une boîte à étoupes, et monte verticalement pour s'attacher à l'indicateur r' (FIG. 1); au même indicateur s'attache un autre fil qui passe sur la poulie r'', et porte un second contre-poids p''; au moyen des contre-poids p' et p'', le flotteur n'est qu'à moitié immergé dans l'eau. Aussitôt que le niveau s'élève ou s'abaisse dans la chaudière, l'indicateur r' en suit les mouvements et les montre au chauffeur.

4° Par le *flotteur d'alarme*. Ce flotteur t est disposé comme le précédent : seulement, sur le fléau qui le porte, dans une partie droite t', est fixée une soupape u, qui vient boucher l'orifice d'un tube par lequel la vapeur peut s'échapper; lorsqu'il y a assez d'eau, le flotteur, aux trois quarts immergé, est repoussé en haut, et appuie fortement la soupape contre l'orifice; mais si le niveau baisse, le flotteur, perdant une moindre partie de son poids, tend à descendre, et descend en effet, lorsque son excès de poids est capable de vaincre la pression de la vapeur contre la soupape. Alors l'orifice est ouvert, la vapeur s'échappe avec violence, et le sifflet v rend un son aigu et pénétrant, qui se fait entendre à une grande distance; tout le voisinage est ainsi averti que l'eau de la chaudière n'est pas à son niveau. Le sifflet v, représenté plus en grand dans la figure 5, n'est autre chose qu'une cloche de bronze dont le bord inférieur, taillé en biseau, vient se présenter au-dessus de la fente circulaire par laquelle s'échappe la vapeur; c'est exactement l'embouchure du sifflet ordinaire.

Un tube x, y (FIG. 2), reçoit la vapeur du sifflet, et la conduit au foyer pour éteindre le feu.

5° Par le *flotteur extérieur* de M. Daliot. C'est un tube de fer ab de 2 ou 3 centimètres de diamètre, qui plonge dans la chaudière à quelques centimètres au-dessous du niveau; à sa partie supérieure il porte un cylindre de cristal cc (FIG. 11), d'environ 10 centimètres de diamètre, qui est lui-même surmonté d'une garniture à robinet r. Dans ce cylindre est un flotteur très-apparent d'un diamètre un peu moindre que le sien, par exemple, une boule de liége, ou une boule creuse de métal, f; en ouvrant le robinet r, la pression de la vapeur fait monter l'eau de la chaudière, qui ne tarde pas à remplir tout l'appareil; alors le flotteur est poussé au sommet du cylindre de cristal; mais il tombe sur sa base aussitôt que le niveau baisse au-dessous

Digitized by Google

de l'extrémité *a* du tube, parce qu'alors l'eau s'écoule dans la chaudière, la vapeur prend sa place, et le flotteur n'est plus soutenu; on est ainsi averti du défaut d'eau. Cet appareil a de réels avantages pour la navigation en rivière, où les oscillations du bateau ne sont pas très-considérables. Le flotteur s'établit sur le pont; et si le niveau de l'eau dans la chaudière tombe au-dessous de son repère, tout le monde peut s'en apercevoir.

Pour compléter ces moyens de sûreté, on exige en France que le métal des chaudières à vapeur cylindriques ait des épaisseurs déterminées à raison du diamètre du cylindre et de la pression intérieure de la vapeur. Ces épaisseurs sont indiquées dans le tableau suivant, qui s'applique également aux chaudières de tôle de fer et à celles de cuivre laminé.

DIAMÈTRE DES CHAUDIÈRES en centimètres.	ÉPAISSEURS DU MÉTAL EN MILLIMÈTRES, POUR LES PRESSIONS EXPRIMÉES EN ATMOSPHÈRES AU SOMMET DE CHAQUE COLONNE.						
	2 atmosph.	3 atmosph.	4 atmosph.	5 atmosph.	6 atmosph.	7 atmosph.	8 atmosph.
centim	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
50	3,90	4,80	5,70	6,60	7,70	8,40	9,30
55	3,99	4,98	5,97	6,96	7,95	8,94	9,93
60	4,08	5,16	6,24	7,32	8,40	9,48	10,56
65	4,17	5,34	6,51	7,68	8,85	10,02	11,19
70	4,26	5,52	6,78	8,04	9,30	10,56	11,82
75	4,35	5,70	7,05	8,40	9,75	11,10	12,45
80	4,44	5,88	7,32	8,76	10,20	11,64	13,08
85	4,53	6,06	7,59	9,12	11,65	12,18	13,71
90	4,62	6,24	7,86	9,48	11,10	12,72	14,34
95	4,71	6,42	8,13	9,84	11,55	13,26	14,97
100	4,80	6,60	8,40	10,20	12,00	13,80	15,60

Proportions de la chaudière et de ses dépendances. — Les observations pratiques ont conduit aux résultats suivants sur les diverses proportions des chaudières.

1° La force d'un cheval, dans la plupart des machines, correspond à une dépense d'environ 30 kilogr. de vapeur par heure.

2° Dans les chaudières à bouilleurs, on compte à peu près un mètre et un quart de surface de chauffe par cheval, en y comprenant la surface de *chauffe directe* des bouilleurs, qui reçoit la chaleur rayonnante du foyer et le contact de la flamme, et la surface de *chauffe indirecte* des parois latérales de la chaudière qui est bien moins efficace, puisqu'elle ne reçoit que le

contact des produits de la combustion, déjà fort refroidis. Ainsi le *mètre moyen* de surface de chauffe ne donne que 24 ou 25 kilogrammes de vapeur par heure, tandis que les expériences ont fait voir qu'un mètre de surface de chauffe directe vaporise jusqu'à 240 kilogrammes par heure, lorsque le feu est poussé avec une grande activité.

3° On admet que, pour une bonne combustion ordinaire, il ne faut pas brûler par heure plus de 1 kilogramme de houille par décimètre carré de grille, vide et plein compris. On sait que le vide qui existe entre les barreaux n'est que le quart ou le cinquième de la surface totale de la grille. Ainsi il faut moyennement 5 décimètres carrés de grille par force de cheval; car s'il y a quelques machines très-économiques où l'on ne brûle que 1 1/2 ou au plus 2 kilogrammes de houille par heure et par cheval, il y a aussi, et il faut le regretter, beaucoup de machines où l'on brûle jusqu'à 5 ou 6 kilogrammes.

4° La section des *carneaux* ou *conduits de fumée* doit être égale partout, et égale à celle de la cheminée; on estime celle-ci à 1 décimètre carré par force de cheval.

De ces données pratiques, il résulte qu'une chaudière de 20 chevaux doit avoir 25 mètres de chauffe, 100 décimètres ou 1 mètre de grille, et 20 décimètres de carneaux et de cheminée.

Les *chaudières des bateaux à vapeur* ne peuvent pas avoir un poids aussi considérable que la chaudière à bouilleurs avec son fourneau de briques; on les allége en les construisant à *foyer intérieur;* c'est-à-dire que le foyer et les conduits de fumée sont partout environnés d'eau, jusqu'à l'ouverture de la cheminée qui est de tôle. Mais, tout en remplissant cette condition, il reste encore une grande latitude pour varier les formes: aussi a-t-on imaginé bien des systèmes différents. Pour la navigation des rivières, on adopte en général les *chaudières tubulaires*, ayant l'eau dans les tubes, et l'on porte les pressions à 5, 6, 7, ou 8 atmosphères; pour la navigation maritime, on reste dans les basses pressions de 1 atmosphère $\frac{1}{2}$ ou 2 atmosphères au plus, excepté aux États-Unis, où l'on emploie presque sans réserve les hautes pressions; en même temps que les basses pressions, l'on adopte en général des chaudières de forme rectangulaire à angles arrrondis, ayant 4, 6, 8 ou 10 foyers, dont les conduits, aussi rectangulaires à angles arrondis, font plusieurs circonvolutions horizontales au milieu de l'eau avant de se rendre dans

la cheminée. C'est ainsi que sont construites les chaudières de presque tous les bâtiments de mer anglais et français, depuis la force de 120 chevaux jusqu'à celle de 450, ou même de 700 à 800 chevaux. Pour donner une idée de cette disposition, je rapporterai les principales dimensions de la chaudière de 160 chevaux, qui est la force la plus commune. La base est à peu près carrée de 7 mètres de côté; la hauteur verticale des deux flancs est de $2^m,5$; mais cette hauteur est de 3 mètres au milieu, parce que la partie supérieure est un peu bombée. Sur la face antérieure s'ouvrent 6 foyers, dans chacun desquels la grille a 1 mètre de surface; les 3 foyers de droite débouchent dans un seul conduit, et ceux de gauche dans un autre; ces conduits ont $1^m,80$ de hauteur et 0,5 de large; chacun se replie 7 fois sur une longueur d'environ 2 mètres, ce qui lui donne 15 ou 16 mètres de longueur; la cheminée est de beaucoup trop étroite, elle n'a que $1^m,22$ de diamètre. Le volume de cette chaudière est d'environ 120 mètres cubes; l'eau en occupe 30, la vapeur 30, et les conduits 60; son poids est de plus de 100 tonnes; mais le poids de l'eau n'est que d'environ 200 kilogrammes par cheval. La surface de chauffe tant directe qu'indirecte est de 230 mètres, mais les conduits à leur partie inférieure chauffent très-peu.

Depuis quelque temps on essaye les chaudières tubulaires pour les bâtiments d'une grande puissance, et il est permis d'espérer que l'on en tirera de grands avantages.

Les figures 13 et 14 représentent l'un de ces systèmes, fort employé aux États-Unis. Dans cette chaudière, la flamme va du foyer au fond par deux larges conduits vus en coupe (Fig. 13), et en élévation (Fig. 14), en *a*, *b*; là, après s'être heurtée et réfléchie contre une paroi derrière laquelle il y a de l'eau, elle se relève pour s'engager dans un grand nombre de tubes, et revenir au-dessus du foyer, où elle trouve la cheminée; dans tout ce trajet elle est enveloppée d'eau de toutes parts, excepté en deux points *c* et *d*, où l'on a ménagé des portes pour nettoyer les tubes, et pour les remplacer au besoin.

La figure 15 représente une vue en dessus des tubes d'*extraction;* on voit, dans la figure 14, que ces tubes prennent naissance sous le foyer, à la partie la plus basse de la chaudière en *e*; chacun d'eux est muni d'un robinet *f*; en ouvrant les robinets, l'eau saturée de sel prend le tube *g* et va gagner le tuyau d'échappement *h* (Fig. 15).

§ 2. — *Machines fixes.*

Pour rendre plus simple la description de la machine qui est représentée dans les figures 1 et 2 (Pl. 13), nous la diviserons en deux parties, savoir : le *mécanisme* et la *distribution*.

166. Le *mécanisme* comprend le cylindre alésé *a*, le piston dont la tige *c* passe par la boîte à étoupe *d*; le balancier *efg*, la bielle *h*, la manivelle *i*, l'arbre tournant *k*, dont on ne voit que l'extrémité dans la figure 1, et le volant *l*, qui est monté sur l'arbre *k*, et qui tourne avec lui.

Lorsque le balancier oscille autour de son axe *f*, ses extrémités décrivent des arcs de cercle $e' e''$, $g' g''$; et pour que la tige du piston ne soit pas déviée et forcée de suivre l'arc $e' e''$, elle est articulée au balancier au moyen de ce qu'on appelle le *parallélogramme* de Watt, dont les pièces sont désignées par c'. On démontre en mécanique que le parallélogramme dont il s'agit jouit en effet de cette propriété. La bielle *h* est simplement articulée à l'extrémité *g* du balancier; il n'y a aucun inconvénient à ce qu'elle parcoure l'arc $g' g''$.

Admettons pour un instant que l'on puisse à volonté faire arriver la vapeur au-dessous du piston, pour le faire monter, et au-dessus pour le faire descendre; admettons de plus qu'au moment où le piston achève sa course ascendante, on puisse subitement détruire la vapeur qui est au-dessous de lui, afin qu'elle ne l'empêche pas de redescendre, et que pareillement, quand il a achevé sa course descendante, on puisse détruire subitement la vapeur qui est au-dessus de lui, afin qu'elle ne l'empêche pas de remonter, et dans cette hypothèse examinons comment la machine pourra marcher.

Prenons le piston au point où il est représenté dans la figure; le vide est fait au-dessus et au-dessous de lui, et il s'agit de le faire descendre. On fait arriver la vapeur en haut; si le cylindre était froid, elle se condenserait et ne produirait nul effet; mais nous admettons qu'il soit à la température même de la vapeur, comme il arrive dans la marche régulière; alors la pression de la vapeur fait descendre le piston, il entraîne l'extrémité *e* du balancier et pareillement l'extrémité *g* qui remonte; celle-ci tire la bielle *h*, qui agit sur la manivelle et l'amène dans la verticale supérieure; la manivelle à son tour a entraîné l'arbre du volant et le volant lui-même. Dans cette position que l'on appelle le

point mort supérieur, la bielle, étant en ligne droite avec la manivelle, n'agit plus pour la faire tourner; mais, en vertu de sa vitesse acquise, le volant continue son mouvement de rotation; il entraîne à son tour la manivelle, la bielle, le balancier et le piston lui-même, qu'il soulève et qu'il force à remonter. Cependant il ne pourrait pas lui faire faire sa course ascendante entière, car la vapeur qui est au-dessus ferait résistance, et cette résistance serait d'autant plus efficace que, sous le piston, il y aurait le vide sans force aucune. Il faut donc détruire la vapeur devenue nuisible qui est en dessus et faire arriver en dessous de la vapeur nouvelle; alors les rôles sont changés : puissance en dessous, résistance nulle en dessus. Le piston remonte, non plus par l'effet du volant qui n'a plus besoin de l'entraîner, mais par l'effet de la vapeur qui le presse; il reprend le rôle de moteur : sa tige pousse l'extrémité *e* du balancier pour la faire remonter, l'extrémité *g* pour la faire descendre, et, par suite, la bielle, la manivelle et le volant lui-même; et cet effet persiste jusqu'à l'instant où le piston, arrivant près du haut de sa course, la manivelle arrive en même temps près du *point mort inférieur;* alors la bielle n'agit plus sous un angle assez petit pour la faire tourner; c'est le volant qui redevient actif, en vertu de sa vitesse acquise; le point mort est de nouveau franchi, le piston commence à redescendre, entraîné par le volant. Mais à ce moment il faut, comme tout à l'heure, détruire la vapeur devenue nuisible qui est au-dessous de lui, et mettre de nouvelle vapeur au-dessus; c'est ainsi que le piston descend de nouveau par la puissance de la vapeur, franchit le point mort par la puissance du volant, et persiste dans son mouvement alternatif tandis que le volant persiste dans son mouvement continu.

On comprend donc l'action de la vapeur sur le piston et du piston sur le volant, quand la manivelle est dans une position angulaire efficace pour tourner par l'effort de la bielle; puis la réaction du volant sur le piston lui-même, quand sa manivelle, arrivant près de ses points morts, attaque à son tour la bielle presque perpendiculairement à sa direction pour la faire tourner et entraîner ainsi le balancier et le piston.

Il en résulte que le mouvement de rotation du volant ne peut jamais être rigoureusement uniforme, puisqu'il perd de sa vitesse près des points morts pour en regagner pendant tout le temps que la bielle agit d'une manière efficace sur la manivelle; mais sa vi-

tesse est périodiquement uniforme, c'est-à-dire qu'à chaque tour ou à chaque double course du piston il reprend les mêmes vitesses.

Puisqu'on détruit la vapeur quand elle a servi, il importe que le piston ne laisse aucun intervalle en bas entre sa face inférieure et la base du cylindre, ni en haut entre sa face supérieure et *le chapeau;* car ces intervalles seraient remplis de vapeur, et cette vapeur serait détruite sans avoir exercé le moindre effet mécanique utile.

D'une autre part, les deux bras du balancier étant en général exactement égaux, il en résulte que la course de la tête du piston est précisément double de la longueur de la manivelle, et que la hauteur intérieure du cylindre est elle-même égale au double de la manivelle, plus l'épaisseur du piston.

Dans les raisonnements qui précèdent, nous n'avons parlé que de la résistance du volant, parce qu'en réalité, dans la machine à *double effet* que nous décrivons, comme dans les machines à simple effet, qui ne reçoivent la vapeur que d'un côté du piston, c'est sur l'arbre du volant que se concentrent en définitive toutes les résistances à vaincre. Quel que soit l'effet mécanique que la machine doive produire, qu'il s'agisse de moudre du blé, d'écraser des graines oléagineuses, de triturer des chiffons, de faire marcher des scies, tourner des broches, travailler des outils, des métiers à tisser, etc., etc., c'est toujours sur l'arbre du volant que se prend la force, et elle s'y prend en général au moyen d'une roue dentée qui tourne avec lui, et qui donne le mouvement, soit à d'autres engrenages, soit à des tambours ou à des courroies, ou à d'autres appareils de transmission destinés à porter la force au point où elle doit produire son effet utile. Ainsi, dès que l'arbre du volant est en mouvement, tout le travail que l'on peut demander à la machine s'accomplit.

Les machines locomotives paraissent être sans volant, mais il est facile de voir que les roues motrices et la masse de la locomotive elle-même produisent un effet complétement analogue; il en est de même des roues motrices des bateaux à vapeur et de la masse du bateau. Quand le volant ne paraît pas explicitement, il existe implicitement dans les masses que la vapeur a d'abord mises en mouvement, et qui continuent à se mouvoir par la vitesse acquise.

Ces considérations suffisent pour faire sentir que les dimensions du volant doivent, pour chaque machine, dépendre de la

nature du travail auquel on veut l'appliquer. Si le travail offre une résistance tantôt nulle, tantôt énorme, comme un laminoir de forge, le volant devra avoir son maximum de puissance, c'est-à-dire beaucoup de masse, et un grand diamètre; dans d'autres cas, quand la résistance doit passer par des variations moins considérables, on diminue la puissance du volant : car, s'il est *réservoir de force*, et si par instant il mène la machine, et fait lui-même l'office de moteur, cela n'empêche pas qu'il *n'absorbe et ne consomme toujours inutilement de la force*, par son frottement sur ses paliers, par la résistance que l'air lui oppose, etc.; il faut donc se garder de lui donner plus de masse et de vitesse que besoin n'est.

On règle, en général, la vitesse des machines (excepté les locomotives) pour que la vitesse moyenne du piston soit d'environ 1^m par seconde, un peu moins pour les machines de 5 ou 6 chevaux, un peu plus pour les machines de 30, 50 ou 100 chevaux. Comme il faut une double course, c'est-à-dire une montée et une descente, ou une allée et une venue, pour que le volant fasse un tour, il en résulte que, dans les machines où la hauteur du cylindre est de 1^m, il faut $2''$ pour une double course, et par conséquent pour un tour de volant; ainsi sa vitesse est de 30 tours par minute. Dans les très-grandes machines, où la course est de près de deux mètres, la vitesse du volant se réduit, en général, à 15 ou 16 tours; au contraire, dans les machines plus petites, où il y a moins de 1 mètre de course, la vitesse monterait à 40, 50, ou même 60 tours par minute; mais on la ralentit en diminuant la vitesse du piston.

Le diamètre du cylindre est, en général, compris entre le tiers et la moitié de la course. Les sections des conduits de vapeur doivent être $\frac{1}{20}$, ou au moins $\frac{1}{25}$ de la section intérieure du cylindre ou du piston.

Pour compléter ces notions indispensables, il nous reste à parler du *cheval-vapeur*. On est convenu d'appeler force d'un cheval, ou cheval-vapeur, la force qui est nécessaire pour élever d'un mouvement continu un poids de 75^k à 1^m de hauteur en $1''$. Cette définition exige quelques développements. Imaginons, pour plus de simplicité, que le volant fasse 60 tours par minute, ou 1 tour par seconde, et supposons que sur son arbre il porte un tambour de 1 mètre de circonférence, sur lequel s'enroule une corde qui descend dans un puits; à cette corde, que nous

supposerons sans pesanteur, est attaché un poids de 750^k. On met la machine en train; elle prend sa vitesse de régime, et bientôt le poids s'élève régulièrement à raison de 1^m en $1''$. Il y a là une certaine résistance vaincue, un certain travail fait, et ce travail est défini lorsqu'on donne à la fois la valeur du poids et la vitesse avec laquelle il est élevé; il ne le serait pas si l'on ne donnait que le poids sans la vitesse, car il n'y a pas le même travail fait quand le poids est monté à raison de 1 mètre par seconde, ou à raison de 1 mètre par heure. On voit que le travail fait est à la fois proportionnel au poids élevé et à l'espace que ce poids parcourt en 1 seconde, en montant verticalement; par conséquent il est égal au produit du poids par l'espace. Or, on a trouvé commode de prendre un de ces produits pour unité, et d'appeler *un cheval* la force qui est capable d'accomplir ce travail; par là on définit en même temps la résistance et la puissance, parce qu'en effet l'une est la mesure de l'autre. Le produit que l'on a choisi pour unité est 75×1, ou 75^k élevés à 1^m en $1''$. Comme ce produit reste le même, quand ces deux facteurs changent dans un rapport inverse, on voit qu'il faut le même travail pour élever, par exemple, 25^k à 3^m en $1''$; ou 3^k à 25^m en $1''$; ou 1^k à 75^m en $1''$, ou, etc.; que par conséquent il faudra, dans tous ces cas divers, la même puissance de 1 cheval. Il en résulte que, si l'on représente, en général, par p le poids à élever, par m le nombre des mètres qu'il doit parcourir en 1 seconde, en s'élevant verticalement, le travail à faire est pm; et si l'on veut avoir le nombre c des chevaux nécessaires pour accomplir ce travail, on aura

$$c = \frac{pm}{75}.$$

Par exemple, on veut dans une mine, en une journée de 10 heures, élever 1800 tonnes de houille, dans un puits de 27 mètres, combien faut-il de chevaux? $p = 1\,800\,000^k$, $m = \frac{27}{36000}$; d'où $c = 18$. Il faut donc 18 chevaux effectifs.

Deux des trois quantités c, p, m étant données, on peut toujours trouver la troisième : seulement, il faut avoir soin d'employer les unités convenues, savoir : le kilogramme, le mètre et la seconde.

Une chute d'eau de 10 mètres donne 2700 hectolitres par heure, combien vaut-elle de chevaux? Le poids qui descend

d'une certaine hauteur dans un certain temps est une puissance capable d'élever un poids égal à la même hauteur dans le même temps; par conséquent

$$p = \frac{270000}{3600} = 75, \quad m = 10, \quad \text{et} \quad c = 10.$$

La chute est théoriquement de la force de 10 chevaux.

Supposons maintenant que la machine à vapeur n'élève plus un poids, mais qu'elle soit appliquée à toute autre chose, par exemple à faire tourner des broches dans une filature. Pendant qu'elle accomplit ce travail, le volant fait encore un tour par seconde. Si l'on débrayait, c'est-à-dire si l'on supprimait l'engrenage qui lie le volant à la filature, la machine prendrait une vitesse accélérée; marchant à vide, elle serait bientôt brisée en mille pièces; mais si, pendant que l'on *débraye* du côté de la filature, on *embraye* du côté d'un tambour sur lequel s'enroule la corde du puits que nous avons pris pour exemple, n'est-il pas évident que l'on peut attacher à cette corde un poids tel que la machine, en le soulevant, marche exactement avec la vitesse qu'elle avait quand sa force était appliquée à la filature? La machine fait donc le même travail dans les deux cas. Or, le travail relatif au poids soulevé est pm; par conséquent pm représente aussi le travail relatif à la filature, et le nombre des chevanx c qu'elle exige est encore donné par la relation

$$c = \frac{pm}{75}.$$

Mais il est impossible d'avoir, près d'une machine, un puits, une corde sans pesanteur, etc., pour apprécier sa force. On y supplée au moyen du *frein de Prony*, qui est représenté dans la figure 3 (Pl. 13). m est une large poulie fixée sur l'arbre du volant; b est une forte barre de bois qui s'adapte sur la poulie; c une sorte de chaîne garnie de plaques de bois, qui enveloppe la poulie, et qui vient par les deux boulons d et d' se fixer à la barre; en serrant les écrous e et e' de ces boulons, la chaîne et la barre sont pressées de plus en plus sur la poulie, et l'on comprend qu'il soit possible de les serrer assez fort, de prendre la barre assez solide, et de la fixer assez bien pour arrêter la machine. Mais ce n'est pas là ce que l'on se propose : on laisse tourner l'arbre du volant; on en diminue seulement la vitesse plus ou moins, en tendant plus ou moins la chaîne au moyen

des écrous, et en suspendant à l'extrémité de la barre un poids p', tel que la barre reste horizontale. Le but de cette manœuvre est d'arriver à remplir les conditions suivantes : à laisser faire à l'arbre du volant exactement le nombre des tours qu'il faisait lorsqu'il était embrayé avec la filature que nous avons prise pour exemple, à le maintenir dans cet état pendant un temps assez long pour que l'on puisse reconnaître le poids p', après s'être assuré que la barre est sensiblement horizontale. Avec ces données, il est possible de calculer le travail que la machine exécutait en faisant tourner les broches. Ce travail est, en effet, exactement le même que celui qu'elle exécute sur le frein, et celui-ci peut être évalué facilement. n est le nombre des tours que l'arbre du volant fait par minute; r est la distance qu'il y a depuis le centre de l'arbre moteur jusqu'à la verticale du point d'attache; p est le poids total que le mouvement soutient en équilibre quand la barre est horizontale. Ce poids se compose du poids p' qui est dans le bassin, de celui du bassin lui-même, et de celui de la barre et de la chaîne, calculés pour être transportés au point d'attache. Cela posé, il est évident que le frein, pour être soutenu dans sa position d'équilibre, exige de la part de l'arbre le même effort qu'exigerait un tambour de rayon r monté aussi sur l'arbre lui-même, et sur lequel s'enroulerait une corde sans pesanteur chargée du poids p. En ôtant le frein pour y substituer ce tambour, les choses ne seraient aucunement changées, et la vitesse du volant resterait la même. Mais le tambour représenterait une quantité de travail exprimée par

$$p . 2\pi r . \frac{n}{60}.$$

Car le poids soulevé par la corde est p, et l'espace parcouru en 1″ est $2\pi r . \frac{n}{60}$, puisque la circonférence est $2\pi r$, et qu'en 1″ il se fait un nombre de tours $\frac{n}{60}$. Le nombre c des chevaux est donc

$$c = \frac{p}{75} . 2\pi r . \frac{n}{60},$$

expression dans laquelle il n'entre que les trois données de l'expérience, n, r, p, et le rapport π de la circonférence au diamètre.

C'est ainsi qu'au moyen du frein de Prony on estime la quantité de travail qui est nécessaire pour accomplir une opération mécanique quelconque, et par suite le nombre des chevaux de force, ou la puissance de la machine que cette opération exige.

167. Distribution. — La distribution comprend, comme pièces fixes, *les conduits de vapeur* et le *condenseur o*; comme pièces mobiles, l'*excentrique t*, la *bielle de l'excentrique t'*, le *tiroir q*, la *pompe à air* ou *pompe d'eau chaude u*, la *pompe alimentaire x*, la *pompe d'eau froide y*, et le *gouverneur* ou *modérateur à force centrifuge z*.

Conduits de vapeur. — La vapeur *arrive* par le tuyau *m* (Fig. 2), pour passer dans le cylindre, comme nous le verrons dans un instant, et elle *sort* par le tuyau *n* pour aller se détruire dans le condenseur *o*, qui est ici placé au-dessous du cylindre. Le conduit *n* ne doit donc jamais être en communication avec le conduit d'arrivée, ni avec la *boite du tiroir* ou espace *m'm'*, où la vapeur se répand librement; la *clef m''*, semblable à une clef de poêle, ayant seulement pour objet d'en modérer plus ou moins l'entrée. Cependant le cylindre ne porte en haut qu'une seule ouverture *p*, par laquelle la vapeur doit entrer pour agir, et par laquelle elle doit sortir pour aller au condenseur; de même il n'y a en bas qu'une seule ouverture *p'* pour l'entrée et pour la sortie. Il paraît donc difficile de faire qu'à point nommé, la vapeur vienne par l'orifice *p*, et sorte par le même orifice, pour aller au condenseur, sans qu'il y ait quelque confusion ou quelque mélange de la vapeur qui arrive avec la vapeur qui s'échappe. Cette difficulté n'est qu'apparente; le tiroir de Watt la résout de la manière la plus simple et la plus ingénieuse.

On appelle *tiroir* la longue pièce *q*, qui est creuse, ouverte aux deux bouts, et traversée dans sa longueur par la tige *q'* qui est destinée à lui donner un mouvement alternatif de glissement, de haut en bas et de bas en haut. Ce tiroir est un segment de cylindre, il se voit en coupe (Fig. 2) et par le *dos* (Fig. 1); ici son enveloppe extérieure a été enlevée pour montrer sa forme ainsi que l'entrée de l'orifice inférieur *p'*, qu'il doit alternativement mettre en communication avec la vapeur et avec le condenseur. Il est en outre représenté à part (Fig. 5, 6); vu à plat et vu en perspective, pour faire comprendre la disposition des *bandes planes r* et *r'*, par lesquelles il glisse sur les plaques des orifices supérieurs et inférieurs *p* et *p'*; ces bandes sont un peu plus gran-

des que les orifices, il y a ce qu'on appelle du *recouvrement* pour que la vapeur soit bien tenue et aussi pour obtenir plus ou moins de *détente*. Enfin les figures 7 et 8 font voir comment les parties saillantes et convexes des deux extrémités du dos du tiroir s'ajustent chacune dans une boîte à étoupes pour que la vapeur ne trouve d'autre issue que les orifices p et p' quand ceux-ci sont ouverts à l'admission. Cela posé, considérons le tiroir dans la position qu'il a sur les figures 1, 2. La bande r est au-dessus de l'ouverture p, qui communique ainsi avec la boîte $m'm'$ du tiroir, et la vapeur afflue au-dessus du piston ; en même temps la bande inférieure r' est au-dessus de l'ouverture p', et la vapeur qui est sous le piston se précipite dans le condenseur par le conduit n (Fig. 2). Quant à la vapeur de la boîte m', elle ne peut pas y aller, elle est arrêtée sur le dos du tiroir par la garniture à étoupe s', et sur le plat par la bande r'. Les choses resteront dans cet état pendant tout le temps de la descente du piston. Mais une fois arrivé au bas de sa course, il faudra que les rôles soient changés, c'est-à-dire que l'orifice p' reçoive la vapeur, et que l'orifice p communique au condenseur. Ce changement s'opère en faisant glisser en bas le tiroir, de manière que la bande r soit *au-dessous* de l'orifice p (Fig. 2), et la bande r' *au-dessous* aussi de l'orifice p'. Dans cette nouvelle position, l'on voit en effet que la vapeur de la boîte m', passant librement sous le plat du tiroir, et n'étant plus arrêtée par la bande r' qu'au-dessous de l'ouverture p', se trouve poussée sous le piston par sa force élastique, et exercera contre lui toute sa pression. En haut, au contraire, la vapeur de la chambre ou de la boîte m' n'a plus d'accès à l'orifice p ; mais cela ne suffit pas : il faut que la vapeur qui est au-dessus du piston puisse s'échapper au condenseur, et l'on voit qu'elle s'échappe en effet ; car, comme nous l'avons dit, le tiroir est creux, et il forme le conduit d'évacuation pour la vapeur supérieure ; aussitôt qu'en descendant, le bord de la bande r a un peu découvert l'orifice p, la vapeur du cylindre se trouve, par l'intérieur du tiroir, en communication avec le conduit n, et par conséquent avec le condenseur o. Toutes les difficultés de la distribution sont donc résolues, si l'on parvient à donner au tiroir le mouvement de va-et-vient dont nous venons de parler, de telle sorte qu'il s'exécute toujours à propos et jamais à contre-temps.

Ce mouvement est donné au tiroir au moyen de *l'excentrique t* et *de sa bielle t'*. L'excentrique est une sorte de poulie fixée sur l'arbre du volant, son centre en dehors, comme le représente à part la figure 4. Ainsi, par rapport à l'axe de rotation, l'excentrique, quoique circulaire, a des rayons inégaux, compris entre le rayon *maximum* qui s'appelle le *grand rayon*, et le rayon *minimum* qui s'appelle le *petit rayon*. La bielle *t'* s'adapte sur l'excentrique par un anneau qui l'enveloppe, et dans lequel l'excentrique tourne; ainsi, quand le mouvement de rotation amène le grand rayon en arrière, la bielle est retirée en arrière; quand il l'amène en avant, la bielle est poussée en avant; son extrémité prend donc un mouvement de va-et-vient d'une amplitude égale à l'excès du grand rayon sur le petit rayon. Les périodes de ce mouvement sont régulières comme celles de la manivelle du balancier, et du piston, dont elles dépendent; mais, suivant le *calage* de l'excentrique, elles sont concordantes ou discordantes. Si, par exemple, le grand rayon de l'excentrique est perpendiculaire à la manivelle, la bielle *t'* et le piston sont d'accord; ils commencent et finissent ensemble leur course, du moins quand la bielle est horizontale comme dans la figure; si au contraire le grand rayon est parallèle à la manivelle, il se trouve vertical en même temps qu'elle, par conséquent la bielle *t'* est au milieu de sa course quand le piston est aux extrémités de la sienne. Pour d'autres angles les rapports sont différents; mais, dans tous les cas, pour un tour de volant, c'est-à-dire pour une double course du piston, il y a toujours une double course de la bielle *t'*. Cela posé, imaginons un levier coudé, *acb* (Fig. 4), tournant autour du point *c* dont la branche *a* soit commandée par la bielle *t'*, il est évident qu'elle en exécutera tous les mouvements; il en sera de même de la branche *b*, et si le point *b* est mis en rapport avec la tige *q'* du tiroir (Fig. 2), on voit que le tiroir prendra lui-même un mouvement de va-et-vient, dont les périodes seront parfaitement réglées sur celles du piston, bien qu'elles puissent être plus ou moins concordantes, suivant l'angle du grand rayon de l'excentrique avec la manivelle. Cette disposition se voit sur les figures 1 et 2; dans la figure 1 on distingue mieux l'axe *c''* du levier coudé, sur lequel agit la bielle *t'*, et les deux *bielles pendantes t''* qui viennent prendre le mouvement sur les bras horizontaux de ce levier, pour le communiquer à la tige *q'* du

tiroir au moyen de la traverse q'' qui est emmanchée sur sa tête.

Pour arrêter la machine, il suffit de soulever le bout de la bielle t' ; l'encoche qui la termine se dégage et n'agit plus sur le levier; pour la mettre en train au commencement du travail, quand le cylindre est froid et plein d'air, on soulève encore la bielle, et pendant quelque temps on gouverne le tiroir à la main, au moyen d'une *manette* que porte l'axe du levier c''.

L'excentrique circulaire, par sa nature, donne au tiroir un mouvement qui n'a rien de brusque; il va et vient comme le piston. Cependant, comme l'orifice p, par exemple, doit commencer à s'ouvrir à la vapeur quand le piston commence à redescendre, et à s'ouvrir au condenseur quand il commence à remonter, il faut qu'aux extrémités de la course du piston les bandes r et r' du tiroir *couvrent* les orifices, car ce que nous venons de dire est vrai pour p' comme pour p. D'une autre part, comme chaque bande doit passer au-dessus et au-dessous de son orifice : r, pour ouvrir à l'*introduction* et à l'*échappement*, r' au contraire pour ouvrir à l'*échappement* et à l'*introduction*, il en résulte que le tiroir est *vers* le milieu de sa course quand le piston est aux extrémités de la sienne; par conséquent le grand rayon de l'excentrique doit être *à peu près* perpendiculaire à la direction de la manivelle. Je dis *à peu près*, parce que la théorie et l'expérience montrent qu'il y a de l'avantage à donner une *avance de tiroir*, c'est-à-dire à incliner de 15 ou 20° le grand rayon de l'excentrique sur la manivelle, de manière que le tiroir ouvre à l'échappement un peu avant que le piston touche au terme de sa course; mais alors il faut en même temps faire des bandes un peu plus larges que les orifices, afin qu'il y ait un certain *recouvrement* qui doit être calculé avec soin.

Détente. — On dit que la distribution se fait à *pleine vapeur* quand l'introduction a lieu pendant toute la course du piston, et qu'elle se fait *à détente* quand l'introduction a lieu pendant une portion de la course seulement. Si l'on arrête la vapeur à $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$ de la course, on dit que la détente se fait à partir de $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$; mais en même temps la détente est de 5, 4, 3, 2, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, lorsqu'on l'estime en volume, puisque le volume de la vapeur devient par la détente cinq fois plus grand, quatre fois plus grand, etc.; tandis qu'elle est de $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, lorsqu'on l'estime en pression, puisqu'à la fin de la course, le volume

étant devenu cinq fois plus grand, la pression est réduite à $\frac{1}{5}$ en adoptant la loi de Mariotte, à $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, etc. Ainsi, dans une machine qui marche à 5 atmosphères, la tension à la fin de la course est de 1 atmosphère, si la détente se fait à $\frac{1}{5}$ de course; elle est de $\frac{1}{4}$ de 5 ou $\frac{5}{4}$ si la détente se fait à $\frac{1}{4}$ de course, etc.

Nous ne pouvons pas calculer ici les avantages de la détente, mais nous allons les faire sentir par un exemple. Concevons deux machines tout à fait pareilles marchant à 5 atmosphères; dans la 1re on fait la distribution à pleine vapeur; dans la 2e on détend à $\frac{1}{5}$ de la course; on ne dépense par conséquent qu'un poids de vapeur cinq fois moindre, et cependant la pression *moyenne* exercée sur le piston est plus du cinquième de la 1re; car celle-ci est de 5 atmosphères pendant toute la course, tandis que la seconde, qui n'est, à la vérité, que de 1 atmosphère à la fin de la course, a une valeur de 5 atmosphères pendant tout le 1er cinquième de la course, et des valeurs comprises entre 5 atm. et $\frac{5}{2}$ atm., entre $\frac{5}{2}$ atm. et $\frac{5}{3}$ atm., entre $\frac{5}{3}$ atm. et $\frac{5}{4}$ atm., et entre $\frac{5}{4}$ et $\frac{5}{5}$ atm. pendant le 2e, le 3e, le 4e et le dernier cinquième de la course; ce qui donne une pression de 2 atm. $\frac{1}{2}$, en prenant seulement la moyenne entre les deux points extrêmes, et une pression plus grande en prenant la moyenne entre les points intermédiaires comme il faudrait le faire. Ainsi, avec cette détente on obtient un effet de plus de $\frac{1}{2}$, en dépensant seulement $\frac{1}{5}$ de vapeur qui ne devrait donner qu'un effet de $\frac{1}{5}$ s'il n'y avait pas d'avantage. L'avantage est donc comme $\frac{1}{2}$ est à $\frac{1}{5}$, ou comme 5 est à 2. L'économie que l'on obtient par la détente peut donc devenir très-considérable.

Excentriques courbes. — Avec les excentriques circulaires, l'avance du tiroir et le recouvrement des bandes, on ne peut cependant obtenir qu'une détente très-limitée; c'est pourquoi on emploie souvent d'autres mécanismes plus efficaces, qui ne sont pour la plupart que des excentriques dont on calcule les courbures variées, pour que le tiroir découvre et recouvre les orifices bien plus rapidement, afin de *couper la vapeur* brusquement à une période donnée de la course. Ces appareils ne donnent qu'une *détente fixe*, quand les courbures sont arrêtées une fois pour toutes; ils donnent une *détente variable* quand les courbures peuvent varier, comme il arrive quand l'excentrique est composé de plusieurs pièces dont on change les positions relatives après avoir arrêté la machine; ils donnent enfin

une *détente variable à volonté* quand, par des dispositions particulières, on peut changer la détente, même quand la machine est en mouvement. C'est là le dernier degré de la perfection, et il existe déjà quelques mécanismes qui atteignent ce but d'une manière satisfaisante. Nous regrettons de ne pouvoir les décrire ici.

Condenseur et pompe à air. — La prompte condensation de la vapeur est l'une des conditions économiques les plus importantes dans les machines à basse pression ; il faut en conséquence faire, dans le condenseur, une injection d'eau froide suffisante. On pourrait la faire périodiquement aux instants où l'échappement commence, parce que c'est surtout dans ces moments-là qu'il faut condenser très-vite la plus grande masse de vapeur; cependant on a coutume de faire une injection continue qui se règle par l'ouverture plus ou moins grande que l'on donne au robinet o' (Fig. 2). La pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau de la *bâche* la pousse avec violence dans le condenseur, où il y a tout au plus quelques centimètres de pression. Il est facile de calculer la dépense d'eau froide : soient p le poids de vapeur consommée par heure, t la température de l'eau froide, t' celle que l'on veut maintenir dans le condenseur, e le poids d'eau nécessaire à la condensation, estimé aussi par heure; l'eau froide gagne en degrés $t'-t$, et en quantité de chaleur $e(t'-t)$. La vapeur perd tant en chaleur latente qu'en degrés, $p(650-t')$ (voy. t. II, chap. de la *Calorimétrie*). On a donc

$$e(t'-t)=p(650-t'), \quad \text{d'où} \quad e=p.\frac{650-t'}{t'-t}.$$

En adoptant 15° pour la température de l'eau froide, on trouve que son poids doit être égal au poids de vapeur p multiplié par 30, 20, 15, 11, 9, suivant que l'on fait la condensation à 35°, 45°, 55°, 65°, 75°. La consommation en vapeur étant d'environ 30 kilogrammes par cheval, on a $p=30\,c$ pour une machine de c chevaux; si l'on représente par n le nombre des tours en 1', ou le nombre des coups doubles du piston, l'on a 60 n pour le nombre des tours par heure; ainsi, à chaque tour, la dépense d'eau froide est

$$x=\frac{e}{60.n}=\frac{30\,c}{60.n}.\frac{650-t'}{t'-t}=\frac{c}{2n}.\frac{650-t'}{t'-t}.$$

Il est facile de voir qu'à chaque tour la somme z des poids de l'eau froide et de la vapeur condensée qui arrivent au condenseur est

$$z = \frac{c}{2n} \cdot \frac{650 - t}{t' - t}.$$

Ainsi, pour une machine de 40 chevaux, faisant 20 tours par minute, les valeurs de z sont à peu près de 33, 21, 16, 13, 10 kilogrammes, suivant que la condensation se fait à 35°, 45°, 55°, 65°, 75°.

On serait porté à croire, au premier instant, que l'on ne peut pas jeter trop d'eau froide au condenseur, afin d'avoir une condensation plus prompte et plus complète ; mais le calcul précédent montre où il faut s'arrêter. En effet, il faut bien retirer l'eau du condenseur, et, pour cela, faire une dépense de force ; pour la retirer du vide sans l'élever, il en coûte autant que si on la prenait sous la pression atmosphérique pour l'élever à 10^m,33 : or, par une condensation à 35°, par exemple, on ne laisse à la vapeur opposante dans le cylindre qu'une tension de 40 millimètres, et l'eau à tirer du condenseur à chaque tour est de 33 kilogrammes. Si l'on voulait condenser à 20°, on ne laisserait, il est vrai, à la vapeur opposante qu'une tension de 17 millimètres; mais aussi il faudrait, à chaque tour de volant, tirer du condenseur 125 kilogrammes d'eau, et certes on perdrait plus de ce côté que l'on ne gagnerait de l'autre ; une bonne condensation doit se faire entre 30 et 40°.

Le condenseur contient toujours de l'air, parce que l'eau froide elle-même en apporte qui se dégage dans le vide, et parce que l'eau d'alimentation en porte aussi dans la chaudière, qui se dégage avec la vapeur ; cet air, même en petite quantité, retarde beaucoup la condensation, et nuit singulièrement à la marche de la machine ; c'est pourquoi il faut veiller avec le plus grand soin à ce que les boîtes à étoupes de la tige du piston et de la tige du tiroir n'en laissent pas entrer quand elles sont en communication avec le vide. On perdrait beaucoup plus par l'introduction de l'air que par les fuites de vapeur qui auraient lieu lorsque les boîtes sont en communication avec la vapeur.

La nécessité d'enlever l'air est ce qui a fait donner le nom de *pompe à air* à la pompe qui retire l'eau du condenseur. Elle est représentée en u (Fig. 2); sa tige u'' s'attache à la demi-lon-

gueur du balancier; elle a donc une course égale à la moitié de celle du piston, et elle ne prend l'eau qu'une fois par double coup, parce que c'est une pompe à clapet, qui se charge en descendant, et qui n'élève l'eau qu'en remontant. La soupape à clapet u' empêche qu'elle ne refoule l'eau dans le condenseur lorsqu'elle descend. Cette disposition a un inconvénient, parce qu'il se fait là, au-dessus du clapet, un matelas d'air qui ôte à la pompe une partie de son efficacité.

L'eau chaude arrive dans la bâche v', d'où elle se dégage par un trop-plein; mais en même temps, du fond de la bâche part un tuyau v qui la conduit à la pompe alimentaire.

Lorsque les boîtes à étoupe donnent des fuites, par où l'air pénètre au condenseur, ou lorsque la pompe à air fonctionne mal, on s'en aperçoit à la puissance de la machine, qui est plus ou moins affaiblie; mais comme on pourrait attribuer cet affaiblissement à une tout autre cause, il est essentiel de connaître à chaque instant la pression qui reste au condenseur; on y parvient en le mettant en communication avec la partie supérieure d'un tube barométrique dont l'extrémité inférieure plonge dans une cuvette pleine de mercure. Quelquefois cette communication s'établit directement (Pl. 12, Fig. 9); d'autres fois elle s'établit indirectement au moyen de l'appareil qui est représenté dans la figure 8 (Pl. 12). Le tube intérieur, ouvert en haut, communique en bas avec le condenseur, tandis que le tube extérieur, fermé en haut, plonge en bas dans une cuvette pleine de mercure, qui reçoit la pression de l'air. Si le vide était fait dans le condenseur, le mercure s'élèverait entre les deux tubes à la vraie hauteur du baromètre. Ce qui manque à cette hauteur est la pression du mélange gazeux qui reste dans le condenseur.

Pompe alimentaire. — C'est une pompe aspirante et foulante à piston plongeur. On voit en v'' la soupape d'aspiration, en x le piston, en x' la tige du piston, et en x'' la soupape de refoulement. Le tube qui est au delà communique avec la chaudière.

Pompe d'eau froide. — C'est en général une pompe aspirante ordinaire, ou une pompe aspirante élévatoire qui prend l'eau dans un puits ou dans une source. Le corps de cette pompe est en y derrière la pompe alimentaire, parce que les tiges des pistons de ces deux pompes viennent s'attacher à la demi-longueur du balancier du côté de la bielle. On voit en y' le tuyau horizontal par lequel elle verse l'eau dans la bâche.

Gouverneur ou modérateur à force centrifuge. — C'est une sorte de losange articulé (Pl. 13, Fig. 2), dont les deux côtés supérieurs z portent des boules pesantes, tandis que les deux côtés inférieurs z' s'attachent à un anneau qui peut couler sur l'axe vertical z''; quand l'anneau monte ou descend, il agit sur un système de leviers qui viennent *fermer* ou *ouvrir* la clef m'' qui est à l'entrée du tuyau d'arrivée de vapeur. C'est par là que la machine se gouverne elle-même : en effet, c'est l'arbre du volant qui fait tourner l'axe vertical z'', et les boules elles-mêmes qui sont montées sur lui ; s'il va trop vite, les boules participent à cet excès de vitesse, elles s'écartent davantage, ouvrent les côtés z' du losange, et font monter l'anneau qui les attache ; alors la clef m'' tourne sur son axe pour diminuer l'introduction de vapeur ; au contraire, si le volant va trop lentement, la vitesse de l'axe z'' se raleutit, la force centrifuge des boules devient moindre, leur poids les fait retomber, les côtés z' du losange se ferment et font descendre l'anneau, qui par ce mouvement, rouvre la clef m'' pour augmenter l'introduction de vapeur.

Quant à la communication du mouvement entre l'axe z'' et l'arbre du volant, elle se fait de diverses manières : ici l'axe z'' porte une roue d'angle qui engrène avec une roue d'angle dont l'axe est horizontal et parallèle à l'arbre du volant : un cordon w transmet le mouvement du second au premier, au moyen de deux poulies correspondantes.

Machines à haute pression. — Les machines à haute pression ne diffèrent pas de la machine que nous venons de décrire : seulement, à force égale, elles ont un cylindre d'un diamètre plus petit et d'une moindre hauteur ; mais, à dimensions égales pour les cylindres, on comprend qu'elles doivent être construites plus résistantes, parce qu'elles ont à faire des efforts plus grands et à supporter des pressions plus fortes. Quand les pressions dépassent 5 atmosphères, on se dispense quelquefois de condenser ; la machine en devient plus simple, mais en même temps son entretien journalier est plus coûteux en combustible, à moins que l'on n'applique à quelque effet utile la chaleur de la vapeur qui se dégage.

Il n'y a donc pas en général de différence essentielle entre une machine à basse pression et une machine à haute pression ; tout système peut s'appliquer aux deux cas, excepté peut-être les machines de Woolf à deux cylindres, où la vapeur ne passe

dans le grand cylindre que par détente, et après avoir produit son effet dans le petit cylindre. Cette machine perdrait une partie de ses avantages, si l'on n'y employait pas de la vapeur ayant au moins 4 ou 5 atmosphères de tension dans la chaudière.

Les divers systèmes se distinguent bien moins par la pression que par la disposition des pièces qui constituent le mécanisme, et par les appareils de distribution.

Indicateur des pressions. — L'indicateur des pressions, imaginé autrefois par Watt, a reçu de tels perfectionnements, qu'il est aujourd'hui un instrument précieux et presque indispensable pour constater la bonne construction d'une machine et l'emploi économique de la vapeur. Cet appareil donne en effet le tracé graphique des pressions correspondantes à chacun des points de la course ascendante et descendante du piston, par des *diagrammes* analogues à ceux qui sont représentés dans les figures 9, 10 et 11 (Pl. 13). La ligne horizontale *ab* représente la longueur de la course du piston, divisée en dixièmes, et la ligne verticale *ac* représente les pressions en atmosphères ou en kilogrammes par centimètre carré, ces pressions étant estimées *en sus* de la pression atmosphérique, en sorte que 1 désigne une atmosphère au-dessus de la pression atmosphérique, et —1 une pression au-dessous de la pression atmosphérique, et par conséquent le vide parfait. La ligne supérieure du diagramme représente les pressions qui s'exercent *au-dessus* du piston pendant sa course descendante; ainsi la figure 9 correspond à une distribution à pleine vapeur, où le piston a éprouvé sans cesse une pression réelle de 2 atmosphères, tandis que les figures 10 et 11 correspondent à des distributions *à détente*, la détente ayant commencé entre 2 et 3 dixièmes de la course descendante, et, à partir de cet instant, la pression primitive de 2 atmosphères ayant diminué à peu près régulièrement, comme l'indique la ligne oblique et presque droite *ef*. La ligne inférieure *fg* représente les pressions pendant la *course ascendante* du piston; la figure 9 correspond au cas où la condensation se ferait brusquement et d'une manière complète; alors le piston, en remontant, ferait toute sa course avec le vide au-dessus de lui; puis, revenu au sommet, la vapeur reviendrait brusquement sur lui avec 2 atmosphères pour reproduire un autre diagramme *gaf* pareil au premier; les figures 10 et 11 correspondent à une condensation

progressive telle qu'elle a lieu en réalité. On voit par l'obliquité de la ligne *fg* que la pression a diminué progressivement pendant que le piston est remonté de $\frac{1}{10}$ à $\frac{24}{10}$, etc.; et qu'arrivé près du sommet de sa course, le vide était presque complet dans la figure 11, et un peu moindre dans la figure 10.

En montrant quel a été l'ordre des pressions pendant cette course entière, ces diagrammes apprennent si la distribution et la condensation s'accomplissent comme il convient; mais de plus il est facile de voir comment on en peut déduire la pression *moyenne efficace*, c'est-à-dire qui produit le mouvement; et comme d'ailleurs on observe aussi la vitesse du piston, l'on a la force et le chemin parcouru, ce qui permet de conclure la puissance de la machine.

Les figures 12, 13 et 14 représentent l'appareil qui trace les diagrammes dont nous venons de parler. Il se compose d'un tambour *a* qui tourne sur lui-même, faisant environ $\frac{3}{4}$ de révolution dans un sens, pendant que le piston de la machine descend, et autant en sens contraire pendant que le piston monte, et d'un crayon *b* qui, en s'appuyant toujours par un ressort sur le papier qui couvre le tambour *a*, y trace le diagramme. Il reste à voir maintenant comment le crayon monte et descend quand la pression augmente ou diminue dans le cylindre de la machine, et comment le tambour reçoit lui-même son mouvement de rotation pour avoir les mêmes périodes de vitesse que le piston.

La pièce qui porte le crayon est fixée sur la tige *c* d'un petit piston *d* (Fig. 13), très-juste et très-mobile, qui est mis en communication avec le cylindre au moyen du robinet *e*. Lorsque tout l'appareil a été ajusté sur le chapeau du cylindre de la machine au moyen de la vis *f*, il suffit d'ouvrir le robinet *e* pour que, l'équilibre de température étant établi, le petit piston *d* reçoive précisément la pression qui a lieu dans le cylindre; le ressort *g* qu'il comprime en s'élevant, permet de régler et de graduer ses mouvements; son élasticité est telle qu'il est au repos quand la pointe du crayon correspond au zéro de l'échelle *h* (Fig. 12), et que la pointe du crayon correspond aux divisions 1, 2, 3, etc., quand il y a sous le petit piston *d* des pressions de 1, 2, 3 atmosphères, la pression atmosphérique s'exerçant toujours sur sa face supérieure.

Le tambour *a*, qui doit tourner avec une vitesse toujours pro-

portionnelle à celle du piston de la machine, est mis en mouvement de la manière suivante : une large poulie *l* (Fig. 14 et 12), reçoit une corde *nk*, qui fait, dans une gorge hélicoïde, autant de tours qu'il en faut pour que sa longueur enroulée soit plus grande que la course du piston ; et l'extrémité de cette corde va s'attacher à la tête de la tige du piston ; cette corde se déroule pendant que le piston monte, et s'enroule pendant qu'il descend. Sur l'axe de la poulie *l* (Fig. 14), est un manchon *l'*, qui tourne avec elle, et sur lequel s'enroule ou se déroule une seconde corde *d* qui a son autre extrémité attachée à la poulie *i*, fixée à la base du tambour *a* (Fig. 13). Un petit tambour *m*, contenu dans celui-ci et renfermant un ressort spiral, sert à tendre les deux cordes *d* et *kn*, et à faire tourner en sens contraire la poulie *i* et le tambour *a* pendant que le piston descend.

Tel est l'indicateur des pressions, perfectionné par M. Combes. On doit à M. Morin d'autres perfectionnements qui permettent d'obtenir successivement plusieurs diagrammes sur un papier continu ; mais alors le mouvement de ce papier est uniforme, il n'est plus réglé par la vitesse du piston.

§ 3. — *Machines locomotives* (Pl. 14).

168. Une locomotive se compose d'une chaudière et de deux machines à vapeur agissant à la pression de 4 atmosphères ½ ou 5 atmosphères et sans condensation. Cet ensemble est porté sur un grand *cadre* ou *châssis* horizontal de bois ou de fer, qui repose lui-même sur les essieux de deux paires ou de trois paires de roues. Dans la plupart des locomotives le *cadre est extérieur*, c'est-à-dire qu'il porte sur l'extrémité même des essieux, et l'on a les *roues en dedans* ; quelquefois cependant il est *intérieur*, et laisse les *roues en dehors* ; dans ce cas, les coussinets sur lesquels il porte embrassent l'essieu près de la face intérieure des moyeux des roues.

Les deux machines à vapeur sont toujours symétriquement placées à *l'avant* de la locomotive ; chaque piston porte une bielle, et chaque bielle agit sur une manivelle. Quelquefois, dans les locomotives à cadre intérieur, ce sont les rayons des deux *roues* correspondantes qui servent eux-mêmes de manivelles ; alors la bielle et la tige du piston sont en dehors. La puissance de la vapeur, en imprimant aux pistons le mouvement alternatif, imprime le mouvement de rotation aux *roues motrices* ou

aux roues qui servent de manivelles; mais elles ne tournent pas sur place; l'adhérence des roues sur les rails force la circonférence à se développer, comme si le rail était une crémaillère et la roue elle-même une roue dentée. De là résulte le mouvement de translation de tout le système. La vitesse dépend du nombre des coups de piston et du diamètre des roues motrices : pour chaque double coup, la roue fait un tour, et la locomotive s'avance de tout le développement de la roue, c'est-à-dire d'une circonférence, à moins qu'il n'y ait un *peu de glissement* de la roue sur le rail, ou de *temps perdu*, ce qui arrive quelquefois par les givres et les brouillards, ou quand on charge la locomotive de conduire un train qui offre trop de résistance.

Soient d le diamètre de la roue exprimé en mètres, $d\pi$ sa circonférence, n le nombre des coups doubles de piston par seconde, le chemin parcouru par la locomotive est

$nd\pi^{m}$ en $1''$; $3600\, nd\pi^{m}$ en 1^{h}, et $3{,}6\, nd\pi^{kilom}$ en 1^{h}.

On a ordinairement $d = 1^{m},40$; $d\pi = 4^{m},40$; ainsi, pour un coup double par seconde, la locomotive fait $15^{kilom},84$ ou environ 16 kilomètres à l'heure, et il faut donner 3 coups doubles par seconde pour obtenir 48 kilomètres ou 12 lieues à l'heure. La course du piston est de 40 centimètres dans les petites machines, et de 45 centimètres dans celle que nous allons décrire; pour un coup double, c'est $0^{m},90$, et pour 3 coups doubles $2^{m},7$. Ainsi, dans les locomotives à grandes vitesses, la vitesse du piston est d'environ 2 mètres et demi ou 3 mètres par seconde; c'est le triple de la vitesse du piston dans les machines ordinaires.

Avec deux cylindres, on n'a pas seulement l'avantage *d'attaquer* à la fois les deux roues motrices pour les faire marcher ensemble, on a de plus l'avantage de remédier en grande partie aux diminutions périodiques de vitesse qui se feraient sentir aux points morts; pour cela on *croise les manivelles*, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas seulement perpendiculaires à l'essieu, mais de plus perpendiculaires entre elles; alors les *points morts sont croisés;* quand l'une y passe, l'autre a son maximum d'effet.

Dans les systèmes de locomotives les plus répandus, et particulièrement dans celui de Stephenson qui est représenté dans la planche 14, les deux cylindres étant dans l'intérieur du cadre, les rayons des roues ne peuvent pas être pris pour manivelles;

alors on est conduit à prendre pour les roues motrices un *essieu coudé*, et *doublement coudé*, comme le représente la figure 1, les deux coudes ayant des *directions perpendiculaires* entre elles, afin d'obtenir, comme dans le cas précédent, le *croisement des points morts*. Les deux bielles s'appliquant à ces coudes comme à de vraies manivelles, forcent l'essieu à tourner, et l'essieu, dans sa rotation, emporte les roues motrices qui sont fixées sur lui.

Ce qui précède suffit pour faire comprendre que la machine locomotive est en réalité pareille à une machine à vapeur ordinaire à haute pression, en ce qui tient aux cylindres, aux pistons, aux bielles et aux manivelles, et qu'elle ne s'en distingue particulièrement que par la chaudière, par la disposition des pièces et leur ajustement, et surtout par les modérateurs qu'il faut mettre sous la main du mécanicien, afin qu'il puisse, sans efforts et à chaque instant, accélérer ou retarder la vitesse, et au besoin donner la vapeur en sens contraire pour éteindre plus promptement la vitesse acquise par la masse énorme de la locomotive et du convoi.

Nous allons essayer de donner une idée de cet ensemble si heureusement combiné; nous prendrons pour exemple la machine à six roues de Stephenson; elle est représentée dans la planche 14. La figure 10 est une élévation de cette machine; la figure 9 une coupe longitudinale; la figure 1 une vue en dessus, lorsqu'on a enlevé la chaudière, et laissé cependant une section horizontale de la boîte à feu à la hauteur du cadre; la figure 2 une coupe transversale, par le dôme de prise de vapeur, suivant la ligne 1,1 de la figure 9; la figure 3 une vue par le *bout de l'avant*, en supposant seulement enlevée la paroi extrême 2,2 (Fig. 9); la figure 4 est la pompe alimentaire; la figure 5 le frein du tender; la figure 6 le mécanisme du changement de vitesse; la figure 7 l'emmanchement des tubes de la chaudière; la figure 8 la coupe plus en grand de l'un des cylindres et de son piston, afin de faire voir la distribution. Toutes ces figures sont, à quelques modifications près, et sur une échelle réduite, celles que j'ai publiées en 1834 dans le *Portefeuille du Conservatoire*, lorsqu'il n'existait encore aucune publication de ce genre ni en Angleterre, ni en Allemagne; j'y ai seulement introduit les perfectionnements les plus récents.

Mécanisme. — (Fig. 1 et 9) *a* est le piston, *b* la tige, *c* la

bielle, *d* l'essieu coudé. Ce que nous venons de dire suffit pour faire comprendre le mouvement de ces pièces.

169. Chaudière et foyer. — Le corps de la chaudière est un cylindre de tôle de fer de $2^m,5$ de long, sur $1^m,2$ de diamètre, qui s'engage par le *bout de l'avant ee*, dans la *boîte à fumée*, et par le *bout de l'arrière e'e'* dans la *boîte à feu*. La forme de la boîte à fumée se comprend par les figures 2, 9 et 10. Les deux premières figures font voir que, de ce côté, le cylindre de la chaudière est fermé par un fond plat *f*, dont la moitié inférieure est percée de 150 trous pareils, très-rapprochés les uns des autres. La forme de la boîte à feu est représentée dans les figures 1, 2, 9 et 10; elle a la même apparence extérieure que la boîte à fumée, si ce n'est qu'elle est plus profonde dans le sens de la longueur de la chaudière; mais en dedans elle en diffère à plusieurs égards : 1° du côté de la boîte à feu, le cylindre formant le corps de la chaudière n'a pas de fond, il est seulement rivé avec elle par son bord *e'*; 2° il y a une enveloppe intérieure *g*, qui en bas, en *h* (Fig. 2 et 9), est clouée de toutes parts contre l'enveloppe extérieure, qui s'en sépare ensuite en rentrant d'environ 1 décimètre, mais qui lui reste unie par des boulons ou *armatures h'*, très-rapprochées les unes des autres; cette enveloppe intérieure ne s'élève qu'à environ moitié du diamètre du cylindre, et là elle porte autant de trous que le fond plat de l'avant, et ces trous se correspondent exactement. Des tubes de laiton *g'*, d'une longueur convenable et d'un diamètre extérieur de 4 centimètres, sont ajustés dans tous ces trous, et établissent ainsi une communication entre la boîte à feu et la boîte à fumée, en même temps qu'ils ferment hermétiquement la chaudière. L'ajustement de ces tubes a présenté d'abord de grandes difficultés; mais Stephenson les a résolues en faisant des bagues d'acier qui s'engagent dans l'intérieur des tubes et qui sont chassées de force ; ces bagues pressent les bouts des tubes contre les parois des trous qui les reçoivent, et l'on parvient ainsi à rendre la chaudière parfaitement étanche. (Voy. Fig. 7, où ces détails sont représentés plus en grand.) Ces tubes, ainsi ajustés, servent de liaison entre la moitié inférieure du fond *f* et la paroi verticale correspondante de l'enveloppe intérieure *g*. Quant à la moitié supérieure du fond *f*, qui, à raison de sa forme plate, ne pourrait pas résister à la pression de la vapeur, elle est consolidée à son tour par de grands boulons de fer *g"*

(Fig. 3 et 9) qui traversent toute la longueur du cylindre, et viennent se fixer à la paroi verticale de l'enveloppe antérieure de la boîte à feu. Ainsi assemblées et consolidées, ces diverses pièces forment une chaudière très-résistante, qui supporte habituellement 5 atmosphères, et qui sans doute pourrait résister à des pressions beaucoup plus fortes.

L'eau de la chaudière se loge, non-seulement dans la partie cylindrique, de manière à couvrir et envelopper tous les tubes; mais, comme le niveau tracé dans la figure 9 l'indique, elle couvre aussi la partie supérieure et horizontale de l'enveloppe *g*, qui est elle-même consolidée par des cornières ou armatures ajoutées au-dessus, et elle pénètre partout jusqu'en *h*, dans l'intervalle de 1 décimètre qui sépare l'enveloppe *g* de son enveloppe extérieure, à l'exception toutefois de l'espace *i* qui est réservé pour la porte du foyer. Le volume d'eau est d'environ 20 hectolitres, et la chambre à vapeur au-dessus du niveau d'environ 10 hectolitres.

Le feu se fait dans l'intérieur de l'enveloppe *g*; les barreaux de la grille sont en *i'* (Fig. 1, 2, 9); on les charge de coke jusqu'à la hauteur de la porte *i*; cette contenance est de près de 7 hectolitres de coke, pesant plus de 250 kilogrammes; l'air pénètre par le dessous de la grille, traverse toute l'épaisseur du coke embrasé en activant la combustion, et les produits enflammés se précipitent par les 150 tubes pour arriver dans la boîte à fumée et s'échapper par la cheminée *i''*. C'est ici que l'ingénieuse idée de M. Pelletan a reçu sa plus importante application : un jet de vapeur dirigé dans la cheminée par le tube d'échappement *j* (Fig. 3, 9), détermine un tirage des plus actifs; sans son secours, on ne serait peut-être jamais parvenu à donner aux locomotives les vitesses de 60 à 80 kilomètres qu'elles prennent souvent sur la plupart des chemins de fer. Dans l'impossibilité absolue d'élever assez la cheminée, on aurait été réduit à activer le feu par des soufflets ou des ventilateurs, et l'on comprend, pour les locomotives, toute l'imperfection de ces moyens. Dans l'intérieur de la cheminée est une véritable clef de poêle *j'* : seulement, elle est percée d'un trou au centre, afin que, dans toutes ses positions, la vapeur du tuyau d'échappement puisse passer. On l'appelle le *papillon*; par des renvois de leviers le chauffeur la manœuvre à volonté. Elle sert à modérer le tirage; de plus, quand on retire le feu,

on la ferme, afin que le courant d'air froid ne produise pas sur la chaudière de fâcheux effets de contraction, qui détermineraient des fuites.

La surface de chauffe est plus efficace dans les locomotives que dans les chaudières ordinaires, soit à cause de la nature du combustible, soit à cause de l'activité du tirage, soit à cause de la forme elle-même de la chaudière. On estime que 1 mètre carré de surface de chauffe directe dans le foyer donne 120 à 180 kilogrammes de vapeur par heure, tandis que 1 mètre de chauffe indirecte dans les tubes donne seulement les $\frac{3}{10}$, c'est-à-dire à peu près 40 à 50 kilogrammes. Or, dans la chaudière que nous décrivons, la surface du foyer est d'environ 5 mètres, la surface totale des tubes est d'environ 40 mètres, ce qui donne pour la surface *réduite* des tubes $40 \times \frac{3}{10} = 12$ mètres, et par conséquent, en somme, 17 mètres de surface de chauffe. La force correspondante serait d'environ 17 chevaux si c'était une chaudière ordinaire; mais ici la force devient triple ou quadruple, elle est de 60 à 70 chevaux, suivant que le feu est poussé avec plus ou moins d'activité.

Le poids total de la machine est de 12 tonnes ou 12 000 kilogrammes en y comprenant l'eau, la chaudière, les essieux, les roues, le cadre et tout le mécanisme. C'est un poids peu considérable pour une telle puissance; en mettant la force de la machine moyennement à 60 chevaux, on voit qu'un cheval de force ne pèse en définitive que 200 kilogrammes. Il n'y a pas besoin de calcul pour voir qu'on ne serait jamais parvenu à un tel résultat sans l'invention des chaudières tubulaires, où la flamme passe dans les tubes; elles seules pouvaient, avec peu de poids et de volume, donner une surface de chauffe suffisante. Cette belle invention est due à M. Seguin aîné, qui en a eu le premier l'idée; mais le mérite de l'exécution et du succès appartient à M. George Stephenson, qui construisit en 1829 la première locomotive puissante de ce système, celle qui a appris à notre siècle tous les prodiges que l'on devait attendre des chemins de fer.

170. Prise de vapeur et distribution. — La vapeur se prend dans le dôme k (Fig. 9), par le tuyau k' qui l'amène dans une sorte de réservoir k''; là, elle traverse le régulateur l pour prendre le tube m, qu'elle parcourt dans toute sa longueur, et à l'extrémité, en dehors du fond f (Fig. 3, 9), elle se divise à

droite et à gauche pour arriver aux cylindres à vapeur par les tubes m' et m'', qui sont vus en place dans la boîte à fumée (Fig. 3). Le régulateur l a reçu des formes diverses : dans la machine de Stephenson, c'est un disque formant cloison entre la chambre k'' et le tube m; mais deux secteurs d'un quart de cercle y sont découpés, et un second disque pareil, et pareillement découpé (Fig. 2), tourne sur le premier au moyen de l'axe l' et de la manette l'' (Fig. 9). Quand les ouvertures des deux disques se correspondent, la vapeur a son plus grand passage ouvert : mais quand le plein du disque mobile couvre plus ou moins le vide du disque fixe, le passage est plus ou moins rétréci, ou même fermé tout à fait. La manette l'' tourne sur un cadran qui indique les degrés d'ouverture.

La distribution se fait ici plus simplement que dans la machine fixe que nous avons décrite; elle se voit sur la coupe (Fig. 9), et plus en grand sur la figure 8. Les deux orifices p et p' du cylindre communiquent par des conduits aux *lumières* n et n' que l'on voit en plan dans la figure 1. La lumière du milieu o est celle d'échappement; elle communique avec la chambre o', qui communique elle-même avec le tuyau d'échappement j. Un seul tiroir q, dont la tige est en q', glisse sur la *plaque des lumières;* c'est une sorte de caisse rectangulaire portant des *rebords* ou des *bandes* r et r', d'une largeur convenablement calculée. L'intérieur du tiroir couvre à peu près deux lumières à la fois : s'il est dans la position indiquée par la figure, la vapeur entre par n', parce que le tuyau d'arrivée m'' communique avec la chambre dans laquelle se meut le tiroir; en même temps, par le dessous du tiroir la vapeur sort de la lumière n pour passer dans la lumière o, dans la chambre o' et dans le tuyau d'échappement j : c'est l'inverse quand le tiroir couvre à la fois o et n. Il faut donc ici imprimer au tiroir un mouvement de va-et-vient d'une amplitude égale à deux largeurs de bande, car la bande r, par exemple, qui se trouve maintenant à gauche de n pour l'échappement, doit, pour l'introduction, passer à droite et couvrir l'espace qui sépare n de o. Mais pour obtenir la détente à divers degrés, il y a diverses conditions de largeur de bande et d'avance de tiroir, dans la discussion desquelles nous ne pouvons pas entrer.

Mouvement du tiroir. — Le mouvement du tiroir se fait, comme dans les machines fixes, au moyen d'excentriques, avec

cette différence que dans les locomotives l'essieu coudé remplace l'arbre du volant. Que l'on conçoive donc un excentrique circulaire dont la bielle est en *s* (Fig. 1); que l'on conçoive d'une autre part un axe *u*, portant deux bras ou leviers perpendiculaires à sa longueur, l'un qui reçoit l'action de la bielle, l'autre qui la transmet à la tige du tiroir, et l'on aura une idée du mécanisme; il est tout à fait analogue à celui de la machine fixe. Mais il y a une autre condition à remplir, importante, indispensable : il faut que le mécanicien puisse subitement, à un instant donné, mettre la vapeur en sens inverse; la difficulté est grande à cause de la rapidité de la vitesse du piston. Les ingénieurs s'en sont beaucoup occupés, et M. Stephenson lui-même en a donné plusieurs solutions; voici celle qu'il a adoptée en dernier lieu. Pour chaque tiroir il établit deux excentriques et deux bielles : la seconde est en *s'* (Fig. 1); les deux excentriques sont calés en sens inverse; le grand rayon de l'un correspondant au petit rayon de l'autre, il en résulte que les mouvements des deux bielles *s* et *s'* sont inverses : quand l'une va, l'autre vient; quand l'une pousse, l'autre tire. D'après cela, concevons le tiroir au milieu de sa course et mû par la bielle *s*; concevons que subitement on détache cette bielle pour mettre en prise la bielle *s'*, il est évident que le tiroir devra rebrousser chemin, et par conséquent que la vapeur sera mise en sens inverse; et cela n'empêchera pas la locomotive de marcher, ni les roues de tourner dans le même sens, en vertu de la vitesse acquise; mais c'est *la marche à contre-vapeur*, c'est-à-dire que toute la puissance de la vapeur est appliquée à détruire le mouvement de la locomotive pour lui imprimer le mouvement contraire. On fait donc le *changement de vitesse* pour arrêter plus promptement la locomotive dans les cas pressants, et on le fait aussi quand on veut, pour quelques évolutions, faire marcher la machine à reculons. L'on voit maintenant que toute la difficulté se réduit à détacher la bielle *s* pour mettre en prise la bielle *s'*, et à accomplir cette inversion par un moyen tel qu'il n'exige de la part du mécanicien qu'un seul mouvement; de plus, comme la tige du tiroir peut, quand le mécanicien agit, se trouver à une période quelconque de son excursion, il faut que le bout de la bielle qu'on veut mettre en prise puisse la saisir partout, et repousser le tiroir si besoin est, pour le mettre à la place voulue par la nouvelle distribution. Pour cela M. Stephenson termine

ses deux bielles *s* et *s'* par deux barres de fer assez fortes, inclinées en forme de V ou de fourches verticales *y*, comme l'indique la figure 6; en haut, l'ouverture de la fourche est égale à l'excursion du tiroir, ou plutôt à l'excursion du bouton du levier sur lequel la bielle agit pour mettre le tiroir en mouvement. Les deux bielles n'étant pas dans le même plan, comme on le voit dans la figure 1, ce n'est pas rigoureusement le même bouton qu'elles viennent saisir; mais cela revient au même, parce que ces deux boutons différents n'en agissent pas moins de la même manière sur l'axe *u* du levier. Le détail de ce mécanisme ingénieux est représenté dans la figure 6. *b'* est le bouton qu'il s'agit de saisir pour faire marcher le tiroir; c'est la fourche *y* de la bielle *s* qui est maintenant en prise, il faut qu'elle quitte et que la fourche *y'* vienne saisir le bouton qui parcourt le petit arc indiqué en ligne ponctuée. Pour cela, le bout de la bielle *s* est suspendu à un axe *v* qui est fixe, mais qui peut tourner : elle est suspendue par deux tiges *vx* et *xy*, articulées en *x*; en tirant la manette *z'*, la tringle *z* fait tourner le levier *v*, et la fourche *y* quitte le bouton et descend; le bout de la bielle *y'* est suspendu de la même manière à l'axe *v'*; à l'instant où *y* descend, *y'* monte, parce que le lien *a* fait tourner *v'* en même temps que *v* et dans le même sens. Ainsi, par le mouvement rapide de la manette *z'*, dans un sens ou dans l'autre, on donne la vapeur d'un côté ou de l'autre du piston. Je n'ai ici parlé que du premier cylindre; le même système est répété sur le second.

On voit sur les figures 9 et 10 le *sifflet w*, la *soupape de sûreté w'*, et le *trou d'homme w''*; la soupape de sûreté, au lieu d'être chargée de poids qui seraient soulevés par les secousses, est chargée par des ressorts dont on a d'avance mesuré et gradué l'effet.

Alimentation. — L'alimentation de la chaudière se fait par deux pompes aspirantes et foulantes, une de chaque côté, dont le piston reçoit le mouvement de va-et-vient de la tige du piston de la machine. L'une de ces pompes, vue en place (Fig. 9), est représentée en coupe (Fig. 4) à l'échelle de $\frac{1}{10}$; on voit qu'elle est à piston plongeur : c'est ce piston horizontal *p* qui est lié à la tige du piston de la machine et qui se meut avec lui, exécutant ainsi le même nombre d'excursions. Les deux soupapes sont des sphères de bronze : pendant l'aspiration, l'inférieure se lève,

tandis que la supérieure est pressée sur son siége par la tension de la vapeur de la chaudière; pendant le refoulement, l'inverse a lieu, l'inférieure est pressée, tandis que la supérieure se lève pour laisser entrer dans la chaudière l'eau qui, pendant l'aspiration, était venue dans le corps de pompe prendre la place du piston plongeur. Cette pompe puise l'eau dans le *tender*, au moyen du tuyau *b'* (Fig. 9); un robinet *b"*, placé sous la main du chauffeur, sert à régler l'alimentation; quand ce robinet est fermé, le piston fait le vide derrière lui, et la force qui le meut est une force perdue; quand il n'est qu'en partie ouvert, l'eau du tender n'a pas le temps de remplir le corps de pompe : elle le remplit partiellement, et l'alimentation est plus ou moins réduite. Quelquefois on adapte à la pompe un tube à robinet qui vient s'ouvrir entre les deux soupapes; alors le chauffeur, en ouvrant ce robinet au moyen d'une tringle qu'il a sous la main, peut vérifier si la pompe produit bien son effet.

Le niveau de l'eau dans la chaudière est indiqué par un tube de niveau qui est sous les yeux du chauffeur, et par deux robinets; l'un au-dessus du niveau, qui doit, quand on l'ouvre, donner de la vapeur, et l'autre, au-dessous, qui doit donner de l'eau.

Le *tender*, ou fourgon d'approvisionnement, est une voiture à quatre roues, qui est liée à la machine par la cheville *c'* (Fig. 9); il contient l'eau dans une vaste caisse avec laquelle communique le tuyau *b'*; cette caisse occupe à l'arrière toute la largeur de la voiture, mais en avant elle n'a que *deux ailes*, entre lesquelles il y a une sorte de *cour* formant magasin à charbon; un tablier de tôle couvre l'intervalle qui le sépare de la locomotive, en sorte que les mécaniciens et les chauffeurs ont ainsi pour leurs manœuvres un espace assez considérable.

Les *freins* servent à arrêter le convoi, par conséquent à détruire la force vive d'une masse énorme qui s'élève souvent à plus de deux cents tonnes et qui est animée d'une vitesse de 10 à 20 mètres par seconde. On comprend que la destruction d'une telle force ne puisse pas s'accomplir instantanément; toutefois elle pourrait s'accomplir dans un temps très-court : c'est ce qui arriverait, par exemple, si la locomotive allait heurter de front contre un obstacle insurmontable, comme serait une montagne, ou si deux convois de même masse et de vitesses égales et contraires venaient à se choquer sur la même voie. Mais qui

pourrait avoir assez peu réfléchi pour ne pas comprendre à l'instant les effets d'un tel choc? pour ne pas voir tous les liens rompus, tous les ajustements brisés et toutes les pièces voler en éclats dans une épouvantable confusion? Il faut répéter ici ce que nous avons déjà dit souvent : dans un temps donné, la matière ne peut, sans rupture, transmettre qu'une force déterminée; ainsi, il ne faut pas plus songer à arrêter brusquement un convoi sans briser quelque chose, qu'à marteler une lame de verre sans la casser; au lieu du coup de marteau qui la brise, elle résiste si l'on prend le temps de lui donner l'équivalent en mille ou dix mille coups successifs. Il en est de même du convoi : pour l'arrêter sans accident, il est indispensable d'y mettre le temps voulu et d'amortir peu à peu la vitesse qui l'anime. On arrive à ce résultat par l'emploi des freins. Ces appareils se composent en général de pièces de bois cintrées qui, au signal d'arrêt, viennent s'appliquer sur les bandages des roues; la pression qu'elles y exercent ne doit d'abord que gêner le mouvement de rotation de celles-ci, ce qui est déjà une cause puissante de ralentissement; mais cette pression peut devenir assez forte pour les empêcher de tourner et pour les obliger, ainsi, à glisser sur les rails, ce qui est une cause de ralentissement bien plus efficace encore, et d'autant plus efficace que les roues appartiennent à un wagon plus pesamment chargé.

Les freins ont reçu des formes très-variées. La figure 5 (Pl. 14) représente une disposition de Stephenson; *b* et *b'* sont les pièces de bois qui doivent s'appliquer sur les roues; *a* et *a'* sont des armatures de fer liées aux pièces de bois, et articulées l'une et l'autre avec la pièce du milieu, dont la tige *t* peut être levée ou abaissée, soit par un levier soit par un mouvement de vis; quand elle se lève le frein entre en prise, quand elle s'abaisse le frein se dégage, et les roues deviennent libres. Le tender, à raison de son poids considérable, porte toujours deux freins, l'un agissant sur les deux roues de droite, et l'autre sur les deux roues de gauche. Il y a en outre des autres wagons à frein, l'un à la queue du convoi, l'autre vers le milieu.

171. Liaison de la chaudière avec le cadre et avec les essieux. — Il nous reste à indiquer comment le système entier de la chaudière et de ses accessoires est porté sur le *cadre*, et comment le cadre est porté sur les essieux. L'ensemble du *cadre* ou *châssis* se voit en *d'* sur la figure 1, avec les deux tampons de

buffle rembourrés de crin, qui le terminent à l'avant pour amortir les chocs; il est formé de quatre pièces de bois solide assemblées à mortaises et reliées par des cornières de fer. La chaudière est fixée sur le cadre par six fortes pièces de tôle e'' (Fig. 2, 3 et 10), soutenues par des cercles e'''. Des deux côtés, et sur sa longueur, le cadre est muni d'armatures ou *plaques de garde*, dont les prolongements correspondent aux centres des roues, et servent à maintenir les coussinets de bronze qui embrassent les bouts des essieux. Tous ces prolongements sont reliés entre eux par des tringles de fer, afin de leur donner plus de résistance en cas de choc. Cependant, ce n'est point par là que se transmet la charge, mais bien par les six paires de ressorts f', dont les deux bouts sont fortement fixés au cadre; du milieu de ces ressorts part un boulon vertical, dont la tête est fixée au ressort, et dont l'extrémité inférieure vient se poser dans une cavité destinée à la recevoir sur le coussinet supérieur qui embrasse le bout de l'essieu; c'est par ces six boulons que tout le poids de la locomotive se transmet aux essieux, et la liaison du coussinet inférieur avec le coussinet supérieur doit être assez solide pour que les chocs ne puissent pas soulever la locomotive et la déplacer.

Cette description rapide suffira, j'espère, pour donner une idée juste et précise de la locomotive à six roues de Stephenson, et celle-là comprise, on pourra se rendre compte de celles qui sont construites d'après d'autres systèmes; car la différence est plutôt dans la forme et l'arrangement des pièces que dans leurs fonctions, qui restent les mêmes.

172. Remarques sur la résistance des convois et sur la limite de puissance des machines. — On a reconnu, par expérience, que sur les voies *de niveau*, et pour des wagons en bon état, l'effort nécessaire pour mouvoir un convoi est $\frac{1}{250}$ de son poids, ou 4 kilogrammes par tonne de 1000 kilogrammes, c'est-à-dire qu'une corde sans pesanteur attachée au convoi horizontalement, et passant sur une poulie pour descendre dans un puits, mettrait le convoi en mouvement lorsqu'elle serait tirée par un poids d'autant de fois 4 kilogrammes qu'il y a de tonnes à mouvoir sur la voie. Ainsi, il est facile de trouver quelle est en chevaux la puissance nécessaire pour mener un convoi de 100 tonnes, par exemple, à raison de 36 kilomètres à l'heure, sur un chemin de niveau.

L'effort est 400 kilogrammes; l'espace parcouru en 1″ est $\frac{36000}{3600} = 10$.

Par conséquent le nombre des chevaux est $\frac{4000}{75} = 53\frac{1}{3}$. Le nombre des chevaux serait donc proportionnel à la vitesse, s'il n'y avait pas de courbes, pas de vent, pas de modification dans les frottements, pas de changement dans la résistance de l'air. Le coefficient de 4 kilogrammes par tonne suppose ces influences prises dans leur état moyen.

On sait que sur un excellent pavé la résistance est quatre fois plus grande, c'est-à-dire d'environ 16 kilogrammes par tonne; sur une route ferrée, huit fois plus grande, ou environ 30 à 32 kilogrammes; sur une mauvaise route, quinze fois plus grande, ou environ 60 kilogrammes.

Il y a une limite à l'effort de la locomotive, parce qu'il y a une limite à l'adhérence des roues sur les rails; on conçoit en effet que si la locomotive était amarrée, en donnant la vapeur, les roues tourneraient sur place, on dit alors que la machine *patine;* si, au lieu d'être amarrée, elle avait seulement à traîner un certain poids trop considérable, les roues patineraient encore. Il faut donc que le poids soit réduit jusqu'à une certaine limite pour que la circonférence de la roue se développe, et que le mouvement de translation s'établisse. Cette limite est variable : dans un beau temps sec, l'adhérence est à peu près $\frac{1}{7}$ du poids qui porte sur les roues motrices; la locomotive de l'ancien modèle pèse 12 tonnes; le poids est réparti de telle sorte que les roues motrices portent à peu près 5 tonnes; l'adhérence est donc $\frac{5000^k}{7} = 715$ kilogrammes : or, 1 tonne de convoi exigeant un effort de 4 kilogrammes, la locomotive pourra entraîner un convoi de $\frac{715}{4} = 179$ tonnes. Dans le mauvais temps, quand les rails sont *gras*, par la brume ou le givre, l'adhérence n'est que $\frac{1}{20}$ du poids qui charge les roues motrices ou $\frac{5000^k}{20} = 250$ kilogrammes : la locomotive alors ne peut donc entraîner que $\frac{250}{4} = 62$ tonnes.

Ces résultats ne s'appliquent qu'aux voies de niveau; pour les rampes, il faut non-seulement avoir égard à l'augmentation de poids qui résulte de l'obliquité, mais encore tenir compte de plusieurs autres circonstances.

LIVRE TROISIÈME.

MAGNÉTISME ET ÉLECTRICITÉ.

PREMIÈRE SECTION.

DU MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

De l'action des aimants sur eux-mêmes et sur les substances magnétiques.

173. On trouve dans le sein de la terre, et souvent même à la surface du sol, des substances qui ont la propriété d'attirer le fer : ces substances, quelle que soit leur forme ou leur composition, s'appellent des *aimants naturels;* autrefois on les appelait *pierres d'aimant*, parce qu'en effet elles offrent dans leur structure une apparence pierreuse plutôt qu'une apparence métallique. Il y a des aimants très-*faibles*, c'est-à-dire que, sous un grand volume, ils n'exercent sur le fer qu'une attraction peu sensible; mis en contact avec de fines limailles, ils peuvent à peine en soulever quelques parcelles : mais il y a aussi des aimants tellement *puissants* qu'ils sont capables de tenir suspendues des masses de plus de cinquante ou même de plus de cent kilogrammes.

Pour montrer la force attractive qui s'exerce entre le fer et l'aimant, on peut faire les expériences suivantes :

1° Si l'on plonge un aimant, par une de ses extrémités, dans la limaille de fer, on voit les parcelles de métal s'attacher à sa surface, et s'attacher les unes aux autres en formant une sorte de chevelure plus ou moins longue : cette adhérence des particules entre elles et leur arrangement est un phénomène digne de remarque, sur lequel nous reviendrons; pour le moment nous

nous bornons au fait principal, qui est une preuve évidente de l'attraction mutuelle du fer et de l'aimant.

2° Si l'on présente à l'aimant, suivant son degré de force, des morceaux de fer plus ou moins volumineux, à peine en sont-ils approchés à quelques millimètres de distance qu'on les sent devenir plus légers : ils sont entraînés, et se précipitent sur sa surface pour y rester suspendus ; il faut ensuite un effort plus ou moins considérable pour les en arracher. Cette expérience est surtout frappante lorsqu'on la fait avec l'électro-aimant, dont la construction sera expliquée plus loin ; cet appareil agit sur des masses de clous ou de pointes de Paris, comme l'aimant naturel ordinaire agit sur la limaille.

En variant ces expériences on peut reconnaître quelques caractères essentiels de cette force attractive, et constater : 1° qu'elle s'exerce à distance ; 2° qu'elle s'exerce au travers de l'air, au travers du vide, et au travers de tous les corps, pourvu qu'ils ne soient pas du fer ; 3° qu'elle diminue à mesure que la distance augmente.

Toutes les attractions étant réciproques, on doit conclure que si l'aimant attire le fer, il est attiré par lui avec la même énergie et suivant les mêmes lois. Cette vérité nécessaire peut, au reste, se vérifier directement par des expériences inverses des précédentes : en suspendant l'aimant pour le rendre mobile, et en faisant agir sur lui des morceaux de fer à diverses distances.

Cette force attractive étant distincte de toutes les autres forces naturelles, on lui donne un nom particulier, on l'appelle *force magnétique*, du mot μάγνης, qui était chez les Grecs le nom de la pierre d'aimant; car les anciens avaient quelque connaissance de ses propriétés : Platon en parle dans plusieurs de ses dialogues, et il faut remonter jusqu'au temps de Pythagore pour recueillir les premières notions qui nous aient été transmises sur ce sujet.

174. Tout aimant a une ligne moyenne et deux pôles. — Le fer semble être à l'égard de l'aimant ce que sont les corps pesants par rapport au globe de la terre : la masse du globe attire les corps dans tous les sens, et les presse sur sa surface. Essayons de voir s'il en est de même de l'aimant, et si, de tous les points de son contour, il exerce une action pareille pour solliciter les parcelles de fer et pour les attirer vers son centre. Prenons pour cela un *pendule magnétique*, c'est-à-dire une pe-

tite balle ou un petit fil de fer suspendu à un fil de soie. En tenant l'aimant à la même distance du pendule, on reconnaît bientôt que certains points de sa surface lui impriment une grande déviation, tandis que d'autres points ne produisent qu'une déviation nulle ou insensible; il y a surtout deux régions opposées qui montrent une action très-vive, et c'est sur l'intervalle qui les sépare que l'on aperçoit le moindre effet. On est conduit au même résultat en employant, pour cette expérience, soit un aimant naturel avec sa forme irrégulière, soit un aimant artificiel ayant la forme d'un cylindre ou d'un prisme allongé. Dans ce dernier cas la différence est plus frappante, et l'on voit sans peine que les sections transversales qui avoisinent le milieu de l'aimant n'agissent point sur le pendule, tandis que les parties extrêmes agissent avec une grande force. On peut donc sur la surface d'un aimant, et vers le milieu de sa longueur, tracer une ligne dont les points n'exercent aucune action attractive : c'est cette ligne que nous appelons *ligne neutre* ou *ligne moyenne;* elle partage l'aimant en deux parties, que nous appelons les deux *pôles* de l'aimant. Ce même mot *pôle* sera pris encore dans deux autres acceptions différentes : nous nous en servirons pour désigner seulement les parties de la surface les plus éloignées de la ligne moyenne, et sur lesquelles l'attraction est la plus forte; et nous nous en servirons aussi pour désigner un point idéal qui sera conçu dans l'intérieur de l'aimant, à peu près comme le centre de gravité est conçu dans l'intérieur des corps, ou dans la masse du globe terrestre qui les attire : car une parcelle de fer n'est pas sollicitée seulement par le point de l'aimant auquel elle vient s'attacher, elle est sollicitée par toute la portion qui est d'un même côté de la ligne moyenne, et la résultante de toutes ces attractions est appliquée en un certain point que nous appellerons le pôle de cette portion de l'aimant. Il sera toujours facile de distinguer celle de ces trois acceptions dans laquelle nous entendrons que le mot *pôle* soit employé. Dans tous les cas, on voit qu'un aimant a une ligne moyenne et deux pôles.

Cette proposition fondamentale peut encore être démontrée par d'autres expériences plus faciles et plus décisives. Si l'on roule un aimant dans la limaille de fer, il se couvre de filaments plus ou moins allongés qui montrent à l'œil l'inégale attraction des différents points de sa surface. Cet arrangement

est représenté (Pl. 15, Fig. 1) pour un aimant naturel, et (Fig. 2) pour un *aimant artificiel*. Aux extrémités e et e' les filaments de limaille sont très-longs et dressés perpendiculairement à la surface; sur les sections moins extrêmes, ils deviennent plus courts, et commencent à s'incliner comme s'ils fuyaient les extrémités pour se rapprocher du milieu; enfin, sur la section moyenne mm', aucune parcelle de limaille ne reste attachée, les filaments qu'on y voit prennent naissance de part et d'autre de cette ligne, et semblent la franchir pour se joindre et s'appliquer sur la surface de l'aimant; mm' est la ligne moyenne; les deux moitiés p et p' sont les *pôles* de l'aimant : cette dénomination, comme il a été dit, s'appliquant parfois aux deux extrémités e et e', où l'action est la plus forte; et d'autres fois aux deux points p et p', que l'on peut regarder comme les centres de l'attraction.

On reproduit des effets analogues en mettant sur un aimant une feuille de carton lisse sur laquelle on laisse tomber de fines limailles avec un petit tamis; par des chocs légers que l'on imprime au carton, la limaille s'arrange en courbes régulières qui sont représentées (Fig. 3), et qui dessinent la forme de l'aimant. Cette expérience fait voir, mieux encore que les précédentes, comment les filets de limaille, partant des deux côtés de la ligne moyenne mm', passent sur cette ligne pour se rejoindre; elle offre aussi une preuve que l'attraction de l'aimant s'exerce au travers de la substance du carton.

Les aimants pouvant être brisés ou coupés suivant la ligne moyenne, il semble, au premier coup d'œil, que les deux portions qui en résultent doivent nécessairement échapper à la proposition dont il s'agit. On pourrait bien supposer que, séparées l'une de l'autre, elles perdent leur propriété magnétique; mais on n'imagine pas que, si elles en conservent quelque chose, elles puissent avoir une ligne moyenne et deux pôles. L'expérience en est facile à faire. Nous verrons plus loin qu'avec de l'acier trempé très-dur on peut faire des aimants qui cassent comme du verre. Prenons un aimant de cette espèce, brisons-le suivant la ligne moyenne, et plongeons dans la limaille chacune de ces moitiés pour observer les modifications qu'elles ont éprouvées : nous trouverons, avec quelque surprise, que chacune d'elles est un aimant tout entier, ayant ses deux pôles et sa ligne moyenne au milieu. En les brisant de nouveau, les moitiés de

ces moitiés présenteront les mêmes phénomènes, et l'on pourra pousser ces subdivisions aussi loin que l'on voudra, sans jamais trouver de limite à cette propriété : les derniers fragments seront des aimants entiers, offrant, comme l'aimant primitif, une ligne moyenne et deux pôles. Nous verrons plus tard la raison de ce fait; mais il était bon de l'indiquer ici, pour faire comprendre toute la généralité du principe dont il s'agit, et pour montrer ainsi l'impossibilité absolue où nous sommes de former un aimant qui n'ait qu'un seul pôle.

175. Les pôles de même nom se repoussent et ceux de noms contraires s'attirent.—La figure 7 représente un aimant suspendu horizontalement au moyen d'une chape de papier ou de métal et d'un gros fil de *soie plate* sans torsion : à chacun de ses pôles *a* et *b* on présente successivement le même pôle d'un autre aimant pareil; le pôle *a* est attiré, le pôle *b* repoussé; et l'on dit que ces deux pôles *a* et *b* sont de *noms contraires*, parce qu'ils agissent en sens contraire sur le même pôle qui leur est présenté. Si les deux pôles de ce premier aimant sont de noms contraires, il est naturel de supposer que ceux du deuxième aimant sont pareillement de noms contraires, et qu'il en est de même de tous les aimants possibles. En effet, si l'on retourne ce deuxième aimant pour le faire agir par son autre pôle sur l'aimant suspendu, on reconnaît de suite que les pôles *a* et *b* éprouvent maintenant des effets contraires : *a* est repoussé, et *b* attiré; donc les deux pôles de l'aimant libre que l'on tient à la main sont aussi de noms contraires, puisque l'un attire ce que l'autre repousse, et *vice versa*. Tout aimant libre présente le même phénomène. Nous appellerons *pôles de même nom* les pôles de différents aimants qui agissent de la même manière, soit sur le pôle *a*, soit sur le pôle *b* de l'aimant suspendu. Ces pôles une fois marqués sur plusieurs aimants afin de les bien reconnaître, que l'on suspende l'un de ces aimants pour faire agir les autres sur lui, et l'on verra que tous les pôles de même nom se repoussent, tandis que tous les autres qui sont de noms contraires s'attirent.

Ainsi, de part et d'autre de la ligne moyenne, dans les deux moitiés d'un aimant résident deux forces, qui d'abord nous semblaient identiques, parce qu'elles agissaient de la même manière sur le fer, et qui sont en réalité deux forces opposées, puisqu'elles agissent en sens contraire sur les aimants, l'une attirant ce que l'autre repousse. La ligne moyenne est la limite

de ces deux forces antagonistes; elle est le passage de l'une à l'autre, et c'est là ce qui rend raison de la neutralité qu'elle conserve.

176. Les actions magnétiques peuvent être attribuées à un fluide particulier. — Lorsqu'on cherche à remonter à l'origine des forces qui produisent les phénomènes magnétiques, on reconnaît bientôt qu'elles ne sont pas, comme la pesanteur, une propriété inhérente à la matière pondérable. L'analyse chimique a démontré que les aimants naturels ne sont que des oxydes de fer ou des mélanges d'oxyde de fer à différents degrés de saturation; l'oxygène et le fer sont donc les seuls éléments pondérables qui entrent dans la composition de ces corps singuliers. Or ni l'un ni l'autre de ces éléments n'ayant la propriété permanente d'exercer des actions pareilles aux actions magnétiques, il est peu probable que leurs molécules prennent en se combinant des propriétés essentielles qu'elles n'avaient pas avant leur combinaison; car, dans la matière pondérable, on n'observe jamais que la forme, l'arrangement ou la disposition des molécules donne naissance à des forces nouvelles qui puissent s'exercer à des distances sensibles. D'une autre part, les forces inhérentes à la matière pondérable peuvent bien être augmentées, ou diminuées, ou modifiées de mille manières, mais elles ne peuvent jamais se détruire ou disparaître : tandis que, dans les aimants, les forces magnétiques ne paraissent qu'accidentellement, car elles peuvent être détruites et reproduites à volonté. On en donne la preuve en faisant chauffer un aimant jusqu'à la température rouge; par cette opération il ne perd rien de ses éléments matériels, et cependant il perd toutes ses propriétés magnétiques. Après le refroidissement, il est, en ce qui tient à la matière, tout à fait ce qu'il était auparavant : mais en ce qui tient au magnétisme, il n'est plus rien absolument, car il n'exerce plus aucune action sur le fer. On peut ensuite, comme nous le verrons, lui rendre ses propriétés magnétiques sans rien lui donner et sans rien lui ôter de pondérable.

C'est par ces raisons, et par d'autres encore, résultant de l'ensemble des phénomènes, que l'on est conduit à regarder le magnétisme comme un fluide d'une espèce particulière, répandu dans la masse pesante de l'oxyde de fer qui constitue l'aimant. Et, puisque nous avons reconnu qu'il y a deux forces magnétiques opposées, nous devons conclure aussi qu'il y a deux fluides

contraires, l'un qui *prédomine* dans l'un des pôles, et l'autre qui *prédomine* dans l'autre pôle. Dans tous les aimants, les pôles de même nom auront le même fluide prédominant, et, comme ils se repoussent, nous en conclurons que chaque fluide se repousse lui-même : les pôles de noms contraires auront des fluides différents, et, comme ils s'attirent, nous en conclurons que l'un des fluides attire l'autre. Ainsi, nous sommes conduits à ce résultat définitif, qu'il existe deux fluides magnétiques, dont chacun se repousse et attire l'autre.

Ces fluides doivent pareillement exister dans le fer, car, s'ils sont distincts de la matière pondérable, on peut présumer que l'action qui s'exerce sur le fer ne s'exerce pas sur les molécules matérielles du fer, mais bien sur les fluides magnétiques contenus dans les intervalles de ces molécules. Nous avons donc quelque raison de chercher le fluide magnétique dans le fer, et de tenter les expériences qui peuvent nous faire découvrir son mode d'existence.

177. Sous l'influence de l'aimant, le fer devient lui-même un aimant. — Pour démontrer cette propriété du fer, on peut disposer l'expérience comme elle est indiquée dans la figure 8 : *f* est un cylindre de fer soutenu par un aimant *ab*; à son extrémité inférieure, on présente de la limaille, qui s'y attache en forme de houppe, et qui reste suspendue aussi longtemps que le petit cylindre est lui-même suspendu à l'aimant; mais, si on l'en détache, à l'instant toute la limaille tombe, et l'on n'observe plus aucune force attractive. Ce n'est pas la force de l'aimant qui agit à distance sur la limaille et la maintient suspendue, car si le petit cylindre n'était pas de fer, le phénomène ne se produirait pas ; et l'on peut encore bien mieux s'en convaincre, en observant : 1° que les filets de limaille diminuent de longueur, à partir de l'extrémité du petit cylindre; 2° qu'il y a un point vers la partie supérieure où ils ne peuvent plus s'attacher, ce qui forme la ligne moyenne; 3° qu'au-dessus de ce point ils s'attachent de nouveau, en se dirigeant en sens contraire. Ainsi, le petit cylindre est bien véritablement un aimant, puisqu'il attire la limaille, et qu'il a une ligne moyenne et deux pôles : seulement, sa ligne moyenne n'est pas au milieu.

Au lieu d'offrir de la limaille au cylindre suspendu, on lui donne un autre cylindre pareil, et il le peut porter (Fig. 9); à celui-ci on en donne un troisième qu'il porte pareillement; à

celui-ci un quatrième, et l'on forme ainsi une sorte de chaîne magnétique dont l'aimant est comme le principe et le premier anneau; si bien que le premier anneau manquant, toute la chaîne tombe et se brise, les autres anneaux n'ayant plus d'action pour se lier l'un à l'autre.

On peut démontrer la même chose en mettant le petit cylindre de fer dans le prolongement du barreau, sur une feuille de papier blanc (Fig. 4). La limaille que l'on projette sur son contour s'y arrange régulièrement, et laisse voir en *mm'* une ligne moyenne qui sépare les deux actions contraires dont le cylindre de fer est maintenant animé, et, dès l'instant que l'on retire le barreau, la limaille n'a plus aucune tendance ni à s'arranger ni à conserver son arrangement primitif; ce qui prouve assez que le fer perd ses propriétés dès qu'il n'est plus sous l'influence de l'aimant. En modifiant cette expérience, on peut prouver que ce n'est pas seulement au contact que le fer reçoit de l'aimant la propriété magnétique, mais qu'il la reçoit à distance, comme on le voit dans la figure 5.

Ainsi le fer contient, comme l'aimant, les deux fluides magnétiques; mais, dans son état naturel, il les contient *combinés*, c'est-à-dire neutralisés l'un par l'autre. C'est pourquoi le fer n'agit pas magnétiquement sur le fer, car ce qui est attiré par l'un des fluides est repoussé par l'autre avec une force égale, et l'action définitive est nulle. Au contraire, quand il est soumis à l'action de l'aimant, ses deux fluides sont *décomposés* : l'un est attiré, l'autre repoussé; une séparation s'opère entre eux : le premier afflue du côté de l'aimant; l'autre afflue à l'extrémité opposée de la masse de fer, et là il devient prédominant au point d'attirer la limaille qu'on lui présente. Aimanter, c'est donc séparer les deux fluides magnétiques; et désaimanter, c'est les réunir ou les recomposer. L'expérience suivante connue sous le nom de *paradoxe magnétique* est très-propre à montrer ce double effet : un aimant horizontal *ab* (Fig. 10) porte vers son extrémité une masse de fer *f* qui est à peu près la limite de ce qu'il peut porter; au-dessus de *ab*, on présente un second aimant *a' b'* de même force, mais dont les pôles sont tournés en sens contraire; on l'approche graduellement du premier, et bientôt le fer *f* se détache et tombe. Ainsi les deux aimants pris ensemble ne peuvent pas porter ce que chacun d'eux porterait aisément, et l'on en conçoit la raison. Le second aimant détruit l'effet du premier

en décomposant en sens inverse les fluides de la masse de fer *f*, tellement que, si ces deux aimants, ainsi retournés, étaient incorporés l'un dans l'autre, ils se désaimanteraient mutuellement, et le fer *f* conserverait son état naturel.

Cependant le phénomène de décomposition des fluides magnétiques pouvant se produire de plusieurs manières, nous devons chercher à reconnaître si ces fluides éprouvent réellement, dans la substance du fer, un mouvement de translation par lequel ils passent d'une extrémité à l'autre de sa masse, ou s'ils n'éprouvent qu'un déplacement moléculaire.

178. Le fluide magnétique ne passe pas de l'aimant au fer, ni même d'une molécule de fer à la molécule voisine. — Avec un aimant, on peut aimanter des morceaux de fer aussi longtemps et aussi souvent que l'on veut, sans qu'il perde rien de sa propriété attractive; donc, par cette opération, l'aimant ne perd pas son fluide pour le donner au fer, puisqu'à la longue il finirait par s'épuiser. De plus, on peut remarquer qu'un morceau de fer qui devient aimant pendant tout le temps qu'il touche un véritable aimant, ne conserve, quand on l'en sépare, aucune trace de ses propriétés magnétiques : donc il ne lui a rien pris, puisqu'il n'a rien gardé. Enfin, et cette observation est encore plus décisive, le cylindre de fer qui touche l'aimant ayant une ligne moyenne et deux pôles, c'est une preuve qu'il possède les deux fluides, et sans doute il n'en pourrait recevoir qu'un seul de l'aimant, si c'était l'aimant qui le lui donnât. Ainsi, le fluide magnétique n'est pas transmissible, c'est-à-dire qu'il ne passe pas d'un corps à un autre.

On pourrait penser que du moins il est dans le corps comme dans un vase fermé de toutes parts, et que s'il ne peut se transmettre au dehors, il peut se déplacer au dedans, et se porter tantôt dans un point, tantôt dans l'autre, et s'y accumuler suivant les forces qui le sollicitent. Cependant nous allons voir qu'il n'en est pas ainsi, car, si l'on met un fil de fer en contact avec un aimant, et que l'on en coupe l'extrémité pendant que les fluides sont décomposés, l'un paraissant en haut et l'autre en bas, on ne retrouve pas la moindre trace de magnétisme dans la partie que l'on détache. Les apparences sont donc trompeuses, et il faut bien se garder de croire que le fluide magnétique puisse se décomposer comme le fluide électrique, et qu'il puisse voyager d'un bout à l'autre du fil qui le contient. Ce ré-

sultat semble un paradoxe inexplicable; mais, avec un peu d'attention, l'on peut concevoir, comme nous le démontrerons, que la décomposition magnétique a lieu dans chaque molécule séparément, que c'est dans cette petite étendue que le fluide peut se mouvoir, de telle sorte qu'il faudrait couper en deux une molécule elle-même pour pouvoir parvenir à isoler l'un de l'autre les deux fluides magnétiques. Voilà le principe des considérations par lesquelles nous pourrons expliquer le phénomène dont il s'agit, ainsi que le phénomène des aimants que l'on brise, et dont chaque moitié devient à l'instant un aimant entier.

179. L'acier prend toutes les propriétés magnétiques des aimants. — La limaille d'acier n'est guère moins attirable que la limaille de fer; elle s'attache aux aimants, et forme aussi de petits filets ou de petites houppes d'une longueur très-sensible. Les fils d'acier qui n'ont d'épaisseur que quelques fractions de millimètre sont encore assez comparables aux fils de fer de même dimension : seulement ils sont plus lents à recevoir l'action magnétique. Mais les morceaux d'acier d'un volume un peu considérable, et surtout les morceaux d'acier fortement trempés, présentent des propriétés tout à fait distinctes de celles du fer, car ils paraissent d'abord ne recevoir des aimants aucune espèce d'influence. On s'en assure en essayant de répéter, avec de petits cylindres d'acier trempé, l'expérience qui est indiquée dans la figure 9. Le premier cylindre ne pourra pas s'attacher à l'aimant, et il sera impossible de former avec l'acier la chaîne magnétique qui se forme si facilement avec le fer. Cependant les petits fragments d'acier étant attirables, il est naturel de supposer qu'en prenant du volume, cette substance ne perd pas complétement sa sensibilité magnétique, et qu'il suffit seulement de quelques précautions pour la rendre apparente autant qu'elle doit l'être. En effet, que l'on mette l'acier en contact avec l'aimant, et que l'on maintienne ce contact pendant un quart d'heure ou une demi-heure, on observe alors un phénomène remarquable. Ce corps, qui semblait au premier instant si insensible au magnétisme, devient magnétique avec le temps; il prend de la force de plus en plus, et à la fin il est attiré aussi puissamment que le fer. On peut même, par un autre moyen, suppléer au temps qui paraît nécessaire pour développer sa force; ce moyen consiste à exercer plusieurs *touches*, c'est-à-dire plu-

sieurs frictions dans *le même sens* sur toute la longueur du morceau d'acier, soit en le faisant passer sur l'aimant, soit en faisant passer l'aimant sur lui (Fig. 26). Par exemple, en traitant de la sorte les petits cylindres dont nous parlions tout à l'heure, et sur lesquels l'aimant n'avait pas de prise, on les voit, après quelques frictions, s'attacher à sa surface, s'attacher l'un à l'autre, et former enfin une chaîne magnétique qui se prolonge comme celle des cylindres de fer. Le premier caractère de l'acier trempé est donc d'exiger, pour devenir magnétique, ou un contact prolongé avec un aimant, ou des frictions répétées. Un second caractère, très-digne de remarque, c'est qu'après ces opérations il conserve *pour toujours* le magnétisme qu'il a pris. Pour preuve de cette vérité, il suffit de rouler dans la limaille l'acier qui a été *touché* par un aimant : on y reconnaît alors une ligne moyenne et deux pôles, et, en un mot, toutes les propriétés qui distinguent les aimants. Qu'on l'essaye encore après un jour ou un mois, ou même après des années, on verra qu'il n'a rien perdu de sa force; enfin, que l'on mette en présence, pour les faire agir l'un sur l'autre, les pôles de même nom de ces *aimants artificiels*, ou leurs pôles de noms contraires, on verra que les premiers se repoussent, et que les autres s'attirent exactement comme le font les pôles des aimants naturels.

Du premier caractère que présente l'acier, c'est-à-dire de la lenteur avec laquelle il cède à l'action des aimants, on conclut qu'il y a dans sa substance une force, ou plutôt une sorte de résistance qui s'oppose à la séparation immédiate de ses fluides magnétiques, et cette force, on l'appelle *force coercitive*. Du second caractère qu'il présente, c'est-à-dire de la faculté avec laquelle il conserve le magnétisme qu'il a pu recevoir, on conclut qu'il y a aussi dans sa substance une force ou une résistance qui s'oppose à la réunion des deux fluides séparés; car les fluides contraires s'attirent et tendent sans cesse à se recomposer ou à se neutraliser, et, s'il n'y avait pas une force qui s'y opposât, les deux fluides se recomposeraient en effet, et l'acier retomberait à l'état naturel dès qu'il serait séparé de l'aimant qui exerce sur lui son action décomposante. Cette résistance à la recomposition des fluides s'appelle encore *force coercitive*, comme la résistance à leur séparation. On n'est pas sûr toutefois que la force coercitive qui s'oppose à la séparation

des fluides soit identique avec la force coercitive qui s'oppose à leur réunion.

L'acier est peut-être de tous les corps de la nature celui qui peut passer par les arrangements moléculaires les plus variés, sans qu'il y ait des différences sensibles dans sa composition chimique. Par différents degrés de trempe ou de recuit, on peut en effet donner au même morceau d'acier les propriétés les plus différentes, les plus opposées; on peut en faire des ressorts parfaitement élastiques, des tiges malléables comme du fer, des limes, des burins, ou d'autres instruments qui sont fragiles comme du verre; aux différents états correspondent des forces coercitives différentes, et la trempe la plus roide, c'est-à-dire celle qui rend l'acier dur et cassant, est en général celle qui lui donne la force coercitive la plus grande.

Le fer prend lui-même un peu de force coercitive lorsqu'il est battu, tordu ou écroui : mais, pour le distinguer, nous appelons *fer doux* celui qui n'a point de force coercitive.

Il résulte de ce qui précède que nous pouvons fabriquer des aimants tout à fait pareils aux aimants naturels, et nous en tirons avantage pour varier à volonté les dimensions et les formes, et les approprier à nos recherches. Les aimants artificiels prennent des noms différents. Une *aiguille aimantée* (Fig. 11) a, en général, la forme d'un losange. Elle est destinée, tantôt à être posée sur un pivot d'acier très-aigu, au moyen d'une chape d'agate *c*; tantôt à être suspendue par un fil de soie d'un seul brin, ou par un assemblage de fils de soie sans torsion. Quelquefois l'aiguille aimantée est un simple fil d'acier, un cylindre ou un prisme allongé. Quand les dimensions de l'aiguille sont un peu considérables, soit en longueur, soit en épaisseur, il ne suffit plus de la passer sur l'aimant pour lui donner tout le magnétisme qu'elle peut recevoir; il faut recourir alors à des procédés particuliers que nous ferons connaître en détail dans le chapitre de l'*Aimantation*.

Une aiguille de grande dimension s'appelle un *barreau aimanté*, ou simplement un *barreau*.

La réunion de plusieurs aiguilles ou de plusieurs lames aimantées ayant toutes les pôles de même nom tournés dans le même sens, forme un *faisceau aimanté* ou un *faisceau magnétique* (Fig. 22, 27, 28).

180. Des diverses substances magnétiques et de leur force

coercitive.—Puisque les fluides magnétiques ne sont pas transmissibles, puisqu'ils restent en quelque sorte inhérents aux molécules pondérables des corps dans lesquels ils se trouvent, il en résulte évidemment que les corps simples magnétiques doivent conserver leurs propriétés d'une manière plus ou moins apparente au milieu des diverses combinaisons dont ils peuvent faire partie. Ainsi, l'on peut s'attendre à retrouver dans toutes les substances ferrugineuses des traces de magnétisme d'autant plus sensibles que le fer y entrera en plus grande proportion ; c'est en effet ce qui arrive : cependant le peroxyde de fer, le persulfure de fer, et d'autres composés dans lesquels la proportion de fer est petite, ne sont plus magnétiques à la manière du fer, de l'acier et de l'aimant, sans qu'il soit possible, quant à présent, d'assigner la cause précise de ce phénomène. Le nickel, le cobalt, le chrome et le manganèse sont les seuls corps simples qui jouissent, avec le fer, de la propriété d'être magnétiques, et cette propriété se trouve de même complétement dissimulée dans la plupart des composés chimiques dont ils font partie. Cependant, par des moyens que nous indiquerons dans l'*Électro-magnétisme*, on parvient à constater des effets magnétiques dans des corps simples ou composés qui avaient, jusqu'à présent, paru insensibles à ce genre de forces; mais, pour cela, il faut des aimants d'une très-grande puissance.

181. Moyen de reconnaître si une substance est simplement magnétique ou si elle est aimantée. — Un corps aimanté a nécessairement des pôles différents, car nous avons déjà dit qu'il est impossible d'isoler l'un des pôles d'un aimant, et par conséquent d'isoler l'un des fluides; les pôles de noms contraires ayant une action contraire sur le même pôle d'une aiguille aimantée, il suffira donc de présenter tous les points d'un corps au même pôle d'une aiguille pour reconnaître son état : si l'action est toujours nulle, le corps n'a point de magnétisme sensible; si elle est toujours attractive, le corps est simplement magnétique; si elle est attractive pour quelque point et répulsive pour d'autres, le corps est aimanté, il y a deux pôles et une ligne moyenne dont on peut trouver la trace.

Il arrive quelquefois qu'un même corps présente plus de deux pôles; alors on dit qu'il a des *points conséquents*. Par exemple, l'aiguille représentée dans la figure 6 offre deux points conséquents : l'un en a', l'autre en b'. Pour en reconnaître la pré-

sence, il suffit de la faire agir sur une petite aiguille d'épreuve comme celle de la figure 25. Celle-ci étant horizontale, on approche l'autre aiguille verticalement, et on la fait monter ou descendre de manière que tous ses points passent successivement devant le même pôle de l'aiguille mobile. S'il n'y a pas de point conséquent, on n'observe qu'une attraction et une répulsion. S'il y a un point conséquent, on observe deux alternatives : par exemple, une attraction d'abord, puis une répulsion, puis une autre attraction. S'il y a deux points conséquents, on observe trois alternatives, etc. ; car, dans un aimant qui présente des points conséquents, chaque pôle touche toujours à un pôle de nom contraire, et les alternatives d'attraction et de répulsion se suivent régulièrement.

Les points conséquents peuvent encore être rendus visibles, soit en plongeant l'aimant dans la limaille, soit en le mettant sous une feuille de carton ou de papier sur laquelle on tamise de la limaille très-fine. C'est la seconde de ces expériences qui est représentée dans la figure 6. Nous verrons plus loin comment les points conséquents ou les pôles multiples peuvent s'établir dans les aiguilles, et comment on peut les faire disparaître et les éviter : ce qui est d'une grande importance dans la construction des boussoles.

CHAPITRE II.

De l'Action magnétique de la Terre.

182. Direction des aimants. — Déclinaison. — Inclinaison. — Une aiguille aimantée, suspendue horizontalement par un fil de soie, ou posée sur un pivot, n'est pas en équilibre dans toutes les positions; mais elle prend une direction déterminée vers un point de l'horizon, et, si on l'en écarte, elle y revient par une série d'oscillations plus ou moins rapides. La force qui la rappelle est une force magnétique, car une aiguille non aimantée n'éprouve rien de pareil. Cette propriété remarquable des aiguilles aimantées se reproduit partout : dans toutes les contrées de la terre, sur tous les continents et sur toutes les mers, au sommet des plus hautes montagnes comme dans les mines les plus profondes, partout l'aiguille aimantée prend une direction fixe à laquelle elle revient lorsqu'on l'en écarte. Il y a donc une force magnétique qui fait sentir ses effets dans tous les points du globe terrestre; car on ne peut pas admettre que les aimants se dirigent eux-mêmes, comme on ne peut pas admettre que les corps se donnent eux-mêmes du mouvement : dans un cas comme dans l'autre, il faut le concours d'une force extérieure.

Nous pouvons reconnaître, par une expérience facile, que cette force a le caractère essentiel de la force qui émane d'un aimant et non pas de celle qui émane d'une masse de fer; car si l'on renverse les pôles de l'aiguille en la retournant *bout à bout*, elle n'est plus en équilibre dans cette nouvelle position, elle fait une pirouette, et décrit d'un côté ou de l'autre toute la demi-circonférence qui l'écarte de sa direction primitive. Donc la force directrice distingue les pôles, et, semblable aux aimants, elle agit par attraction sur l'un et par répulsion sur l'autre, tandis que le fer attire l'un ou l'autre sans distinction et avec la même énergie.

Où se trouve le centre de cette action magnétique, si universellement répandue sur tous les points de la terre? C'est une

question qui paraît difficile à résoudre, et qui fut autrefois un grand sujet de discussion parmi les physiciens. Les uns mettaient, avec Cardan, le siége de cette force dans une petite étoile qui forme la queue de la grande Ourse; les autres le plaçaient au pôle du zodiaque; et même il y en eut qui, trouvant sans doute le ciel trop étroit, imaginaient par delà les cieux et les étoiles un centre attractif d'où arrivait à la terre la force qui dirige les aimants. Mais Gilbert, le premier fondateur de la science du magnétisme et de l'électricité, mit un terme à toutes ces vaines hypothèses en démontrant, autant qu'on pouvait le faire à son époque, que le globe de la terre est magnétique, et que c'est son action qui dirige l'aiguille aimantée [1].

En discutant les observations qui ont été faites dans les différents climats, nous serons en effet conduits, par leur ensemble, à regarder la terre comme un vaste aimant dont la ligne moyenne est située dans les régions équatoriales. On en tire un moyen de caractériser et de définir les deux fluides magnétiques: on appelle *fluide boréal* celui qui domine dans l'hémisphère boréal de la terre, et *fluide austral* celui qui domine dans l'hémisphère austral; et puisque ce sont les fluides de noms contraires qui s'attirent, il en résulte que c'est le pôle *austral* d'une aiguille qui se dirige vers le *nord* et son pôle *boréal* vers le *sud*.

Dans le même lieu les aiguilles aimantées, qui sont assez distantes pour ne pas réagir l'une sur l'autre, prennent des directions sensiblement parallèles: mais, sur des points de la terre qui sont éloignés de quelques degrés en longitude ou en latitude, ce parallélisme n'existe plus; il importe par conséquent de pouvoir définir la direction de l'aiguille aimantée, c'est-à-

[1] Gilbert écrivait vers la fin du XVIe siècle, et son Traité *de Magnete magneticisque corporibus, et magno magnete Tellure* est un vrai modèle d'invention et de sagacité. Voici ce qu'il dit au troisième livre de cet ouvrage, chap. Ier, p. 116 de l'édition de 1628, en parlant des aiguilles qui se dirigent : « Nunc « verò harum rerum causæ et admirabiles efficientiæ, antea conspicuæ, sed non « demonstratæ, nobis aperiendæ sunt. De hisce conversionibus qui ante nos « scripserunt omnes, tam breviter, tam jejunè et ancipiti judicio, opiniones suas « tradiderunt, ut nemini vix unquam persuadere, nedum ipsis satisfacere posse « videantur, et a prudentioribus, omnes eorum ratiunculæ, tanquam inutiles, « incertæ, et absurdæ, nullis demonstrationibus aut argumentis suffultæ, reji- « ciuntur, undè et neglecta magis incomprehensa exulavit magnetica scientia. »

dire de pouvoir la rapporter à des lignes connues et invariables, afin de reconnaître dans le même lieu quels sont les changements que cette direction éprouve avec le temps, et quels sont les rapports qui existent entre les directions que l'on observe dans les lieux différents. Voici à cet égard quelques définitions géométriques qu'il importe de bien saisir.

Le *méridien magnétique* est le plan qui passe par le centre de la terre et par la direction de l'aiguille horizontale, ou simplement la *trace* que ferait ce plan sur la surface de la terre. On sait que le *méridien terrestre* ou le *méridien astronomique* d'un lieu est le plan qui passe par ce lieu et par l'axe de la terre, et que la *ligne méridienne*, ou simplement la *méridienne*, est la *trace* de ce plan sur la surface terrestre. Le méridien magnétique et le méridien astronomique sont deux plans verticaux, puisqu'ils passent l'un et l'autre par la verticale du lieu pour lequel on les considère; mais ces deux plans verticaux peuvent faire entre eux un angle plus ou moins grand.

La *déclinaison* de l'aiguille aimantée est dans chaque lieu l'angle que fait le méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que la direction de l'aiguille horizontale fait avec la méridienne. La déclinaison est *orientale* quand le pôle austral de l'aiguille passe à l'est de la méridienne, et *occidentale* quand il passe à l'ouest. Par exemple, *sn* (FIG. 16) est la méridienne de l'Observatoire de Paris, et *ab* la direction de l'aiguille horizontale au même lieu : la déclinaison est occidentale, et se trouve à présent d'environ 20°, car nous verrons qu'elle change avec le temps. Il y a des lieux sur la terre où l'aiguille se dirige exactement suivant la méridienne : pour ces lieux la déclinaison est nulle, et l'ensemble des points successifs dans lesquels ce phénomène se présente forme ce qu'on appelle des *lignes sans déclinaison*. Nous verrons que d'un pôle à l'autre il existe au moins deux lignes sans déclinaison, qui traversent les mers et les continents dans des directions tout à fait sinueuses et irrégulières.

Tout appareil propre à observer la déclinaison s'appelle *boussole de déclinaison*. Dans nos climats et presque par toute la terre, l'aiguille de déclinaison se rapprochant plus des points cardinaux du nord et du sud que de ceux de l'est et de l'ouest, on dit communément qu'elle se dirige vers le nord.

L'*inclinaison* est l'angle que fait avec l'horizon une aiguille

qui peut se mouvoir librement autour de son centre de gravité dans le plan vertical du méridien magnétique. Concevons une aiguille *acb* (FIG. 13), mobile autour d'un axe central *c* et pouvant parcourir toute une circonférence dans le plan vertical *zch* : si ce plan de rotation coïncide avec le méridien magnétique, l'angle *ach* sera l'inclinaison du lieu. A Paris, l'inclinaison est d'environ 67°, et c'est le pôle austral qui plonge au-dessous de l'horizon. L'aiguille, il est vrai, fait avec l'horizon quatre angles, qui sont égaux, deux à deux : mais l'on convient toujours de prendre pour l'inclinaison le plus petit des deux angles qu'elle forme, et même, pour fixer les idées, le plus petit des angles que forme sa partie inférieure ; ainsi, l'inclinaison est toujours plus petite que 90°.

Les appareils propres à observer l'inclinaison s'appellent *boussoles d'inclinaison*.

Si, par exemple, on part de Paris avec un appareil de cette nature pour s'avancer vers le pôle boréal de la terre, on observe que l'inclinaison augmente en même temps que la latitude, et il y a quelque part dans ces parages, à une certaine distance du pôle de rotation de la terre, un point où l'aiguille d'inclinaison est exactement verticale, et où l'inclinaison est par conséquent de 90° ; ce point est le *pôle magnétique boréal* de la terre.

Au contraire, si l'on part de Paris pour s'avancer vers le pôle austral de la terre, l'inclinaison diminue avec la latitude, et, lorsqu'on arrive dans la zone équatoriale, on trouve un certain point où l'inclinaison est tout à fait nulle, c'est-à-dire où l'aiguille d'inclinaison est exactement horizontale. En passant outre, on retrouve une autre inclinaison ; mais alors c'est le pôle boréal de l'aiguille qui plonge au-dessous de l'horizon, et qui plonge de plus en plus à mesure que la latitude australe augmente. Il y a donc, vers le pôle austral de la terre, un autre point où l'aiguille d'inclinaison se relèverait exactement dans la direction du fil à plomb, son pôle boréal en bas et son pôle austral vers le zénith, et ce point, dont la position précise est encore inconnue, est le *pôle magnétique austral* de la terre.

Quel que soit le méridien sur lequel on traverse la zone équatoriale, on trouve toujours un point où l'aiguille est horizontale, et la série de ces *points sans inclinaison* forme autour de la terre une courbe que l'on appelle l'*équateur magnétique*. Cette courbe est régulière dans une partie de son cours, et alors elle

suit très-sensiblement la direction d'un grand cercle qui serait incliné à l'équateur terrestre, de 12° à 13°, et qui le couperait, d'une part, à l'ouest de la côte occidentale d'Amérique, vers l'île Galego, et, d'une autre part, vers la côte occidentale d'Afrique, en s'inclinant du côté du sud, dans la partie de l'océan Atlantique qui sépare ces deux points. Mais des observations répétées indiquent en même temps que l'équateur magnétique éprouve dans la mer du Sud, entre les îles Sandwich et les îles des Amis, des sinuosités nombreuses dont il est difficile de rendre compte.

183. **L'action magnétique que la terre exerce sur une aiguille aimantée peut être représentée par un couple, c'est-à-dire par un système de deux forces égales parallèles et opposées.**— Concevons, en effet, une aiguille aimantée *amb* (Fig. 18) dont la ligne moyenne soit en *m*, et remarquons d'abord que le fluide austral libre qui est répandu dans la longueur *am* est toujours égal en quantité au fluide boréal libre qui est répandu dans la longueur *mb*; car ces deux fluides résultent du fluide naturel décomposé, et, en se combinant de nouveau, ils se neutraliseraient exactement. Si nous considérons maintenant l'action totale que le fluide boréal de la terre exerce sur l'aiguille, il est évident qu'elle se réduit à un couple, car, à distance égale, la somme des attractions qu'il exerce sur le fluide austral de *ma* est égale et opposée à la somme des répulsions qu'il exerce sur le fluide boréal de *mb*, et l'aiguille est si petite, par rapport à la distance qui la sépare du fluide boréal disséminé dans l'hémisphère terrestre, que les deux actions dont il s'agit sont rigoureusement parallèles. Ce que nous venons de dire du fluide boréal terrestre s'applique au fluide austral; donc, à la surface de la terre, une aiguille est sollicitée par deux couples qui se réduisent en un seul par la composition des forces parallèles; donc, enfin, l'action terrestre peut être représentée par un seul couple.

Il en résulte que la force magnétique de la terre n'est ni une force attractive ni une force répulsive, mais seulement une force directrice, incapable d'imprimer aux aimants un mouvement quelconque de translation.

Cette conséquence peut être vérifiée par plusieurs expériences.

1° Une aiguille aimantée, flottant sur l'eau au moyen d'un léger morceau de liége, prend la direction du méridien magné-

tique, mais elle n'éprouve ensuite aucun glissement sur la surface de l'eau ; ce qui prouve bien que la résultante des actions terrestres ne peut donner aucune composante horizontale.

2° Une aiguille aimantée est équilibrée (Fig. 14) sur une planchette horizontale suspendue à un fil sans torsion, et, dans cet état, elle se dirige encore exactement dans le méridien magnétique, ce qui ne pourrait avoir lieu si elle était sollicitée par une force horizontale attractive ou répulsive.

3° Une aiguille d'acier ne prend pas la moindre augmentation ni la moindre diminution de poids lorsqu'on l'aimante : or, elle éprouverait nécessairement un changement de poids si la force terrestre avait une résultante verticale attractive ou répulsive.

Les deux points où se trouvent appliquées dans une aiguille les deux forces égales parallèles et opposées qui constituent le couple terrestre, sont les véritables *pôles* de l'aiguille ; leur position dépend de la distribution du magnétisme, comme nous le verrons dans le chapitre suivant ; mais, dans tous les cas, il faut que la ligne qui les joint soit exactement dirigée dans le plan du méridien magnétique pour que l'aiguille horizontale se trouve en équilibre ; c'est donc la direction de cette ligne qui donne la véritable direction de l'aiguille aimantée : or, comme la *ligne des pôles*, qui est l'axe magnétique, peut ne pas coïncider avec la *ligne des pointes*, qui est l'axe de figure, il est essentiel de se mettre à l'abri de cette cause d'erreur ; on y parvient par la méthode suivante, que l'on appelle la *méthode du retournement*.

Soit une aiguille horizontale *efgh* (Fig. 17), dont les pôles sont irrégulièrement placés, l'un en *a*, l'autre en *b* ; dans sa position d'équilibre son axe de figure *iu* fera, par exemple, avec la ligne méridienne du lieu un angle *ucn*, tandis que son axe magnétique fait un angle *akn* : si l'on retourne les faces sans retourner les pôles, et qu'on l'abandonne de nouveau à elle-même, elle s'arrêtera dans la position *e' f' g' h'*, de manière que l'axe *a'b'* soit parallèle à *ab*, car telle est la condition d'équilibre ; alors l'axe de figure *i' u'* fait avec la méridienne un angle *u'cn* beaucoup plus grand que tout à l'heure, tandis que l'axe magnétique fait le même angle ; et il est facile de voir que la moyenne des angles *ucn* et *u'cn* est précisément l'angle *mcn*, c'est-à-dire la déclinaison cherchée. C'est ainsi qu'il faut toujours observer la déclinaison par la *méthode du retournement*, sous peine de

commettre des erreurs qui s'élèvent ordinairement à plusieurs degrés.

La *direction* de la force magnétique de la terre est maintenant facile à définir et à trouver, car elle coïncide avec la direction de l'aiguille d'inclinaison qui est en équilibre dans le plan du méridien magnétique. En effet, quand cette force agit seule sur une aiguille, elle ne peut la laisser en repos qu'après en avoir amené l'axe ou la ligne des pôles dans sa propre direction ; et, pour qu'elle agisse seule sans être combattue ni par la pesanteur ni par aucune résistance, il faut que l'aiguille soit suspendue par son centre de gravité, et qu'elle puisse se mouvoir dans le plan du couple : double condition qui se trouve remplie dans la boussole d'inclinaison, lorsqu'elle est bien faite et lorsqu'elle est exactement tournée dans le plan du méridien magnétique. Cette direction étant une fois définie, nous allons faire connaître les instruments qui servent à l'observer, savoir : la boussole de déclinaison, la boussole d'inclinaison et la boussole des variations diurnes.

184. Boussole de déclinaison. — Cet instrument est représenté (Pl. 16, Fig. 1, 2, 3, 4).

gg' (Fig. 4) est l'aiguille de la boussole ; ses pôles sont en *a* et *b* ; vers son centre elle est percée d'une ouverture *t* de 7 à 8 millimètres de diamètre, afin qu'elle puisse facilement être soumise à la méthode du retournement ; elle est équilibrée d'elle-même sans contre-poids, et par conséquent elle ne pourrait plus se tenir horizontale si elle était désaimantée.

cc' (Fig. 3) est une coupe de la chape d'agate. Cette pièce doit être travaillée avec un grand soin, surtout à son sommet intérieur, où est la petite surface courbe qui doit poser sur la pointe du pivot *p* ; et à son contour extérieur, où vient s'ajuster l'ouverture centrale de l'aiguille.

Le pivot *p* a sa pointe travaillée sous un angle de 15 à 20°. L'anneau *aa'* est destiné à soulever la chape de l'aiguille, soit pour décharger le pivot quand l'appareil n'est pas en expérience, soit pour arrêter des oscillations d'une trop grande amplitude. La tige de cet anneau se prolonge jusqu'à l'extérieur de la boîte, où elle s'ajuste à un bouton qui l'élève ou qui l'abaisse à volonté.

La figure 2 représente la coupe de la boussole.

gg' est l'aiguille ;

dd', un cercle divisé sur lequel on lit la division correspondante aux extrémités de l'aiguille;

bb' le bord de la boîte, qui est en cuivre rouge, comme tout le reste de l'appareil;

vv', le verre qui ferme la boîte pour éviter l'agitation de l'air;

xy, un axe solide qui fait corps avec le fond de la boîte, et qui peut tourner sur son extrémité conique inférieure dans une petite cavité de la vis *w*.

Cette rotation emporte l'axe, la boîte et toutes les pièces adhérentes; mais, en même temps, le pied de l'instrument reste fixe, ainsi que le cylindre *ll'*, qui enveloppe l'axe *xy*, et qui est destiné, au moyen de six rayons tels que *or* et *o'r'*, à porter le cercle divisé *zz'* que l'on appelle *cercle azimutal*.

Deux verniers, diamétralement opposés, dont l'un est représenté en *n* (Fig. 1), sont fixés sur le bord de la boîte pour tourner avec elle, et pour marquer de quel angle elle tourne, soit en partant du zéro, soit en partant d'une division donnée du cercle azimutal.

Les vis calantes *vv'* servent à rendre l'appareil horizontal au moyen du niveau *n'*.

tt' (Fig. 1) est une lunette : elle est portée sur un axe de rotation *ee'*, parallèle au cercle des azimuts, et dont le milieu est dans la verticale du pivot. On remplit cette condition au moyen des petites vis qui terminent le montant *m'*. Dans son mouvement de rotation, la lunette emporte un vernier *is* (Fig. 1) qui parcourt l'arc divisé *uu'*, et qui donne immédiatement l'angle du rayon visuel avec l'horizon.

Pour observer la déclinaison au moyen de cet instrument, on le dispose horizontalement, on fait tourner la boîte pour amener dans le champ de la lunette un astre connu dont on observe la hauteur; en même temps, on lit la division correspondante du cercle de l'aiguille et celle du cercle des azimuts, ce qui donne l'angle du méridien magnétique avec le vertical de l'astre au moment de l'observation. Il reste ensuite à trouver, par les méthodes astronomiques, l'angle du vertical de l'astre avec le méridien du lieu pour en déduire la déclinaison. Si l'aiguille de la boussole n'est pas éprouvée d'avance, et si l'on ne connaît pas sur elle l'influence du retournement, il est nécessaire de faire une seconde observation après l'avoir retournée, comme nous l'avons dit précédemment.

Pour donner une idée des changements qu'éprouve la déclinaison, nous présentons, dans le tableau suivant, les observations qui ont été faites à Paris à diverses époques.

Déclinaisons observées à Paris.

Années.	Déclinaisons.	Années.	Déclinaisons.
1580	11°30′ est.	1816	22°25′ ouest.
1618	8	1817	22 19
1663	0	1823	22 23
1678	1 30 ouest.	1825	22 22
1700	8 10	1828	22 5
1780	19 55	1829	22 12
1785	22 00	1832	22 3
1805	22 5	1835	22 4
1813	22 28	1851	20 25
1814	22 34	1853 (3 décembre)	20 17

On voit, 1° que, depuis 1580, la déclinaison a varié de plus de 30°;

2° Que c'est en 1663 qu'elle a été nulle;

3° Que sa marche a été sensiblement progressive vers l'ouest depuis les premières observations jusqu'en 1814;

4° Que, depuis cette époque, elle semble éprouver un mouvement rétrograde vers l'orient.

La *boussole marine* ou *compas de variation* n'est autre chose qu'une boussole de déclinaison : seulement, elle est suspendue de manière à se maintenir, au milieu de l'agitation de la mer, dans une situation sensiblement horizontale. Les figures 5 et 6 représentent une vue et une coupe de cet instrument.

bb′, bords de la boîte dont le fond est en *ff′*.

v, verre qui la ferme.

t, pivot qui s'élève ou s'abaisse au moyen de la vis *w*.

gg′, aiguille dont la chape est en *c*.

rr′, feuille mince de papier, doublée d'une feuille de talc ou de quelque autre substance légère et rigide. Ces feuilles forment ce qu'on appelle la *rose des vents;* elles sont attachées ou collées à l'aiguille pour se mouvoir avec elle. La rose est un cercle dont le centre est dans la verticale du pivot, et dont la circonférence porte à la fois des divisions en degrés et les signes des vents.

pp′, deux pinnules, la première ayant une fente étroite et la seconde une large fente au milieu de laquelle on fixe un fil vertical.

m, miroir à faces bien parallèles, incliné de 45°, et ayant à

peu près la largeur de la pinnule oculaire *p*. La petite bande du miroir qui correspond à la fente de cette pinnule est désétamée dans sa partie supérieure seulement, pour que l'observateur puisse, au travers de la glace, viser au fil de la pinnule *p'*.

o, position de l'œil au moment de l'observation. Au moyen des deux pinnules, on vise à un astre, ou à un objet situé dans l'horizon ou élevé à 15 ou 20°. En même temps on voit, par réflexion sur le miroir, en *i*, une portion de la *ligne de foi f*, qui est peinte en noir sur le bord intérieur de la boîte; et en *i'* la division de la rose qui se trouve vis-à-vis la ligne de foi, c'est-à-dire dans le plan vertical du pivot et des fentes des pinnules.

De cette manière on connaît d'un seul coup d'œil l'angle de l'aiguille ou du méridien magnétique, avec le plan vertical de l'astre ou de l'objet. Il reste à déterminer, par les moyens connus, l'angle de ce dernier plan, avec le méridien astronomique du lieu, pour en déduire la déclinaison. Tout l'instrument est porté sur une traverse *tt'* (Fig. 6) qui se visse sur un pied où elle peut tourner librement; un cercle fixe *cc'* est porté sur cette traverse; un cercle intérieur *ee'* repose sur le premier, et tourne sur l'axe *xx'*; enfin, la boîte elle-même est portée par ce cercle mobile, et tourne sur lui au moyen de l'axe *zz'* qui est perpendiculaire à *xx'*. C'est par ces deux mouvements rectangulaires que la boîte conserve son horizontalité; ils constituent ce qu'on appelle la *suspension de Cardan*.

La figure 7 représente une *boussole d'arpenteur*, dont on comprendra facilement l'usage d'après ce qui vient d'être dit.

La boussole a été en usage chez les Chinois longtemps avant d'être connue en Europe. On peut conclure de plusieurs documents authentiques, rapportés dans la *Description de l'empire de la Chine* par Duhalde, que, plus de mille ans avant Jésus-Christ, les Chinois se servaient de la boussole pour se diriger sur les continents. On a supposé que Marco Paolo nous avait apporté cette invention; mais ce voyageur célèbre, qui connut si bien la Chine, ne fut de retour en Europe qu'en 1295; et il est parlé de la boussole dès 1180 dans les vers de Guyot de Provins, et dès 1266 dans l'histoire de Norvége. On s'accorde en général à regarder les Melphitains comme les premiers inventeurs de la boussole européenne, et il paraît constant que son usage ne fut un peu répandu que vers l'an 1300.

On croyait, dans les premiers temps, que l'aiguille aimantée se tournait directement au nord dans tous les lieux de la terre; et l'on rapporte que Colomb fut très-étonné d'observer une déclinaison en 1492, lorsqu'il parcourait l'Océan pour aller découvrir le nouveau monde. Il paraît que Cabot, de Venise, qui devint grand pilote d'Angleterre, fit des observations analogues vers l'an 1500.

Le fait de la déclinaison une fois connu, il fallait découvrir les variations qu'elle éprouve lorsqu'on passe d'un lieu à l'autre. Les premières tables un peu précises qui constatent ce phénomène important furent dressées en 1599 par les navigateurs hollandais, d'après les ordres du prince de Nassau.

Enfin, le changement de la déclinaison dans le même lieu fut découvert en 1622 par Gunter, professeur au collége de Gresham : il trouva à Londres une déclinaison orientale de 6° 13′; tandis qu'elle avait été trouvée de 11° 15′, aussi à l'orient, en 1580, par Robert Norman, le même qui découvrit l'inclinaison en 1576.

185. Boussole d'inclinaison. — Elle est représentée dans les figures 9, 10, 11, 12, 13.

La figure 10 représente l'aiguille d'inclinaison *gg′* vue sur sa largeur, et la figure 11 la représente vue sur son épaisseur. Les sections *s*, *s′*, *s″*, donnent une idée de sa forme.

ee′ est une sorte de virole ou d'anneau de cuivre qui s'ajuste, à frottement très-serré, vers le milieu de la longueur de l'aiguille; il porte un axe de cuivre *cc′*, terminé par de petits cylindres d'acier poli *a* et *a′* qui forment l'axe de rotation. L'axe mathématique de ces deux cylindres doit passer par le centre de gravité de l'aiguille : on essaye d'atteindre cette condition, ou du moins d'en approcher le plus possible, en plaçant l'anneau convenablement et en faisant mouvoir les vis latérales *vv*.

L'aiguille est en place dans la figure 9; le rectangle sur lequel elle repose est une pièce importante de la boussole. On le voit plus en grand et avec plus de détails dans l'élévation (Fig. 12) et dans la coupe (Fig. 13). Il se compose d'une traverse fixe *tt′* qui porte le couteau d'agate *pp′*, et d'une autre traverse *mm′* mobile autour de l'axe *a*. Celle-ci porte une fourchette *f* qui soulève l'axe de l'aiguille quand on ne veut plus qu'elle repose sur les couteaux d'agate, et d'une pièce d'arrêt *r* qui empêche l'axe de glisser sur la fourchette. Cet ajustement est combiné pour que l'axe de l'aiguille se trouve exactement au centre du

limbe d'inclinaison ll' (Fig. 9), et perpendiculaire à son plan dès qu'on abaisse la fourchette pour commencer l'observation.

Le limbe ll' repose perpendiculairement sur une plaque solide pp' qui porte aussi les montants du rectangle, une cage de verre rr' et un niveau nn'. Tout ce système est mobile autour d'un axe vertical xx', qui passe par le centre du cercle ll', et par conséquent par le centre de gravité de l'aiguille. Un vernier ii', attaché à la plaque pp', parcourt le cercle azimutal zz' pour marquer à chaque instant sur ce plan les angles décrits par le limbe vertical.

Pour observer l'inclinaison avec cet instrument, quand on connaît déjà la déclinaison ou la direction du méridien magnétique, on met le limbe vertical dans cette direction, et l'aiguille vient d'elle-même se placer suivant la ligne d'inclinaison : si l'on ne veut pas attendre qu'elle soit en repos, on prend le milieu des petites oscillations qu'elle fait avant de s'arrêter. Après ce premier résultat, on retourne les faces de l'aiguille sans en retourner les pôles, afin de corriger par ce retournement les erreurs qui pourraient provenir soit de l'irrégularité de l'aimantation, soit de l'excentricité du centre de gravité; mais ces deux causes d'erreur n'étant par là qu'imparfaitement compensées, il est nécessaire de faire deux autres observations pareilles, après avoir renversé les pôles de l'aiguille en l'aimantant dans le sens contraire. C'est la moyenne de ces quatre résultats qui donne l'inclinaison.

On peut facilement se dispenser de déterminer d'avance la déclinaison. En effet, le couple terrestre étant contenu dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille n'est jamais sollicitée à sortir de ce plan, et par conséquent elle doit se diriger verticalement quand on l'oblige à se mouvoir dans un plan vertical perpendiculaire à ce méridien. Réciproquement, si l'on tourne le limbe de la boussole jusqu'à ce que l'aiguille soit verticale, on peut être assuré qu'il est alors perpendiculaire à l'aiguille de déclinaison, et il suffit de lui faire décrire, à partir de là, 90° sur le cercle azimutal pour l'amener dans le méridien magnétique. On pourrait encore, pour plus de simplicité, chercher par quelques tâtonnements l'azimut du limbe qui donne le minimum d'inclinaison : ce minimum est l'inclinaison du lieu, puisque de part et d'autre l'aiguille se rapproche de la verticale.

Le tableau suivant contient diverses inclinaisons observées à

Paris. Celles qui précèdent 1798 peuvent offrir des erreurs assez considérables, parce qu'alors on ne prenait pas la moyenne de quatre observations, comme nous l'avons indiqué.

Tableau de l'inclinaison pour Paris.

Années.	Inclinaisons.	Années.	Inclinaisons.
1671	75°	1819	68° 25′
1754	72 15′	1820	68 20
1779	72 25	1821	68 14
1780	71 48	1822	68 11
1791	70 52	1823	68 8
1798	69 51	1825	68 0
1806	69 12	1829	67 41
1810	68 50	1831	67 40
1814	68 36	1835	67 24
1816	68 40	1851 (novembre)	66 35
1818	68 35	1853 (décembre)	66 28

Sauf quelques irrégularités, il résulte de ce tableau que l'inclinaison, à Paris, a toujours été en diminuant depuis 1671, et que la diminution a été sensiblement variable d'une année à l'autre. Cependant depuis 1835 elle paraît être régulièrement de 3′ par an, ce qui donne à défaut d'observations directes, 67° 9′ pour le 1er janvier 1841, et 66° 39′ pour le 1er janvier 1851.

La découverte de l'inclinaison remonte à l'année 1576; elle est due à Robert Norman, ingénieur en instruments dans l'un des faubourgs de Londres : jusque-là on avait supposé que l'aiguille devait être horizontale, et, lorsqu'en Europe on voyait son pôle austral s'abaisser, on se contentait d'admettre que le centre de gravité était mal déterminé. Robert Norman, observateur plus ingénieux et plus précis qu'on ne l'était alors, mesura le contrepoids qu'il fallait ajouter, et fut conduit ainsi à l'une des plus importantes découvertes du magnétisme.

186. Boussole des variations diurnes. — L'aiguille de déclinaison éprouve tous les jours quelques mouvements à l'est ou à l'ouest du méridien magnétique : tantôt ces mouvements sont brusques et accidentels, tantôt ils sont réguliers et périodiques : dans le premier cas, on les nomme *perturbations;* dans le second cas, ils se composent de ce qu'on appelle les *variations diurnes*. Dans les jours qui ne sont pas marqués par quelques perturbations, l'on observe à Paris les phénomènes suivants : pendant la nuit, l'aiguille est à peu près stationnaire; au lever du soleil, elle se met en mouvement, et son pôle austral (ou son extrémité nord)

marche à l'ouest comme s'il fuyait l'influence de cet astre; vers midi, ou plus généralement de midi à trois heures, il atteint son *maximum* de déviation occidentale; ensuite, par un mouvement contraire, il revient à l'orient jusqu'à 9, 10 ou 11 heures du soir : alors, soit que l'aiguille ait repris exactement sa position primitive, soit qu'elle s'en trouve seulement très-rapprochée, elle s'arrête et reste immobile pendant toute la durée de la nuit, pour recommencer le lendemain une oscillation pareille.

L'*amplitude* de la variation diurne est l'angle que parcourt l'aiguille depuis la station du matin jusqu'au maximum de déviation occidentale. Cet angle est toujours variable : cependant il résulte des nombreuses observations de Cassini qu'en général il est plus grand pendant l'été, depuis l'équinoxe du printemps à l'équinoxe d'automne; et plus petit pendant l'hiver, depuis l'équinoxe d'automne à l'équinoxe du printemps. La valeur moyenne, pour les mois d'avril, mai, juin, juillet, août et septembre, paraît être de 13′ à 15′; et seulement de 8′ à 10′ pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février et mars. Il y a des jours où cet angle s'élève jusqu'à 25′, et d'autres où il ne dépasse pas 5 ou 6′.

On doit encore à Cassini cette remarque importante que, dans les caves de l'Observatoire, l'aiguille de déclinaison éprouve aussi des changements journaliers; là, à près de 30 mètres sous terre, à l'abri de toutes les influences de la lumière et de la chaleur du jour, l'amplitude de ses variations est la même qu'à la surface du sol, et c'est aux mêmes heures qu'elle est immobile, qu'elle marche à l'occident et qu'elle revient à l'orient.

Dans les régions les plus septentrionales, comme en Danemark, en Islande et au nord de l'Amérique, les variations diurnes sont en général plus considérables et moins régulières; il paraît aussi que l'aiguille ne conserve pas pendant la nuit l'immobilité qu'on observe à Paris, et que c'est vers le soir seulement qu'elle atteint son *maximum* de déviation occidentale.

Au contraire, en partant du nord pour aller vers l'équateur magnétique, les variations diurnes vont sans cesse en diminuant d'amplitude, et sur l'équateur magnétique lui-même elles sont sensiblement nulles. Il paraît cependant, d'après quelques observations du capitaine Duperrey, que la position du soleil au nord ou au midi de l'équateur terrestre pourrait avoir quelque in-

fluence pour faire osciller, de part et d'autre de l'équateur magnétique, les points qui sont sans variations.

Au sud de l'équateur magnétique, les variations diurnes se produisent dans un ordre inverse : l'extrémité nord de l'aiguille marche vers l'est, aux mêmes heures où, dans l'hémisphère boréal, elle marche à l'ouest ; ce résultat curieux est constaté par des observations qui ont été faites, en 1794, 1795 et 1796, au fort Marlborough de Sumatra, et à Sainte-Hélène, par M. J. Macdonald ; en 1818, 1819 et 1820, à l'île de France, à Timor, à Rawak, à Guham, à Movi et au port Jackson, par le capitaine Freycinet ; et en 1822, 1823 et 1824, dans plusieurs points qui avoisinent l'équateur magnétique, par le capitaine Duperrey.

L'aiguille d'inclinaison est soumise à des variations diurnes, comme celle de déclinaison, mais elle a moins d'amplitude dans ses mouvements.

En généralisant ces résultats, on peut présumer qu'une aiguille aimantée, mobile dans un plan quelconque, éprouverait des oscillations journalières, et qu'une aiguille qui serait mobile dans tous les sens, autour de son centre de gravité, décrirait chaque jour un cône dont la base serait une ellipse ou une autre courbe plus ou moins allongée dans les différents lieux de la terre.

Les variations diurnes furent observées pour la première fois par Graham, à la fin de 1722 ; ensuite elles furent étudiées avec soin, en Suède, par Hiorter et Celsius, vers 1740, et par Wargentin, en 1750 ; à Londres, par Canton, en 1756 ; en Danemark, par Lous, de 1765 à 1772 ; à Rome, par le père Ascleppi, en 1772 ; en France, par Cassini, de 1780 à 1790. Depuis cette époque, les instruments sont devenus plus parfaits, les observations se continuent sur plusieurs points du globe, et les voyageurs, dans leurs courses autour du monde, doivent les compter comme un des objets les plus importants de leurs recherches.

La figure 8 représente la *boussole de variation*. Tous les observateurs ne peuvent pas sans doute se procurer un instrument aussi complet, mais tous peuvent disposer des aiguilles d'après les principes de sa construction, et arriver ainsi à une assez grande exactitude dans les observations. Il est presque inutile de faire remarquer que toutes les pièces de métal sont en cuivre rouge très-pur.

zz', table de marbre blanc, sur laquelle reposent les colonnes et la boîte de l'instrument.

ss', colonnes pour la suspension.

mm, colonnes pour le premier microscope.

m'm', colonnes pour le second microscope.

bb', boîte de la boussole.

aa', aiguille aimantée, passée de champ dans un petit anneau de cuivre *n*. A cet instrument est attaché un fil, ou plutôt un assemblage de fils de soie sans torsion, qui porte l'aiguille, et qui vient s'enrouler sur le petit treuil *t*. Ce fil est maintenu au centre du cercle divisé *cc*, en traversant, là, une petite ouverture triangulaire. Il est enfermé dans une cage de verre qui s'élève entre les deux colonnes *ss* pour que l'air ne puisse ni l'agiter ni pénétrer dans la boîte; en tournant le treuil *t* dans un sens ou dans l'autre, on peut élever ou abaisser l'aiguille. Deux lames de verre, mobiles à volonté, ferment les ouvertures de la boîte, qui correspondent aux deux extrémités de l'aiguille; sur chacune de ces extrémités, est solidement fixée une petite plaque d'ivoire, portant des divisions très-fines dont la valeur angulaire dépend de la distance au centre de suspension; c'est en général 15 ou 20'.

Après avoir disposé l'appareil à peu près dans le plan du méridien magnétique et l'avoir nivelé soigneusement, on s'assure que le fil de soie est sans torsion, et, par quelques tâtonnements, on arrive à diriger les microscopes *r* et *r'* sur la ligne de foi de l'aiguille, dont on voit la trace sur les deux plaques d'ivoire. Alors il est facile d'observer les déplacements qu'elle éprouve, soit en comptant les divisions qui ont passé sous le fil, soit en suivant ses mouvements, au moyen des vis de rappel qui font marcher les microscopes. De petites loupes *p* et *p'*, mobiles sur les tiges *i* et *i'*, servent à lire la position ou la course de chaque microscope sur la traverse qui le porte et qui règle son mouvement latéral.

On ne doit s'approcher de cet appareil qu'avec de grandes précautions, et sans avoir autour de soi aucune pièce de métal.

187. Perturbations de l'aiguille aimantée.— Plusieurs causes naturelles agissent sur l'aiguille aimantée, ou pour la déranger brusquement de sa position, ou pour troubler au moins la régularité de ses variations diurnes. Entre toutes ces causes,

l'aurore boréale paraît la plus efficace et la plus infaillible : quand ce météore se lève pour les régions du nord, le ciel est resplendissant de lumière, et, pendant toute sa durée, qui est quelquefois de dix à douze heures, l'aiguille aimantée éprouve une agitation continuelle et une déviation considérable. Le *sommet* de l'arc étincelant de l'aurore boréale est en général dans le méridien magnétique, et sa *couronne*, c'est-à-dire le foyer vers lequel s'élancent les gerbes de feu qui semblent partir de l'horizon ou de l'arc lui-même, se trouve toujours à peu près dans le prolongement de l'aiguille d'inclinaison. Ce n'est pas seulement dans les lieux où l'aurore boréale est visible que la boussole est agitée; elle l'est aussi à de grandes distances, à Paris, par exemple, alors même qu'on n'aperçoit dans le ciel aucune trace de lumière. Mais en général, l'agitation est d'autant plus grande, que le phénomène est plus voisin et se montre avec plus d'intensité. Ainsi, la boussole de l'Observatoire éprouve souvent, dans le jour ou dans la nuit, une déviation subite qui s'élève parfois à plus de 1° sans qu'on en puisse découvrir la cause apparente; et l'on apprend ensuite qu'aux mêmes instants les boussoles de Londres et de Pétersbourg ont éprouvé des mouvements analogues, et que dans les contrées du Nord on a observé quelque brillante aurore boréale. Un observateur, dans son cabinet, est donc averti par la boussole de ce qui se passe dans les régions polaires, comme il est averti par le baromètre de ce qui se passe dans les plus hautes régions de l'atmosphère.

Les tremblements de terre et les éruptions de volcans paraissent agir aussi sur l'aiguille aimantée, et quelquefois ces phénomènes la dérangent d'une manière permanente. D. Bernouilli a vu, en 1767, l'inclinaison diminuer d'un demi-degré par un tremblement de terre, et le P. de la Torre a remarqué des changements de plusieurs degrés dans la déclinaison pendant une éruption du Vésuve.

Plus récemment, en 1839, M. Capocci, directeur de l'Observatoire de Naples, a vu la déclinaison diminuer brusquement de plus d'un demi-degré, pendant l'éruption du Vésuve.

Enfin, l'on a supposé que les ouragans, la neige et les orages ont aussi quelque influence sur l'aiguille aimantée : mais il faut probablement rapporter aux aurores boréales les changements sur lesquels on a fondé cette opinion. Cependant, quand le

tonnerre frappe des corps aimantés, ou quand il tombe seulement à quelque distance du lieu où ils sont, il change, détruit, ou renverse leur magnétisme; on en a vu de trop malheureux exemples à bord des vaisseaux : plusieurs fois les boussoles de service ont eu leurs pôles renversés par la foudre, et les navigateurs prenant alors le nord pour le sud, couraient avec confiance se jeter dans les écueils.

La découverte de l'électro-magnétisme nous expliquera ces phénomènes.

188. Intensité magnétique de la terre. — Un des points les plus importants de la théorie du magnétisme terrestre, est la détermination de son intensité pour les différents points de la surface du globe, ou pour le même point, à des époques différentes. C'est dans ces derniers temps seulement qu'on a eu l'heureuse idée d'appliquer à cette recherche des moyens susceptibles de quelque précision. Graham paraît être le premier qui se soit occupé de cette question, vers la fin de 1722; Muschenbroek fit quelques efforts pour la résoudre en 1729; Lemonnier, en 1776, se contenta d'en montrer l'importance; de Saussure voulut comparer la force magnétique de la terre, à Genève et au sommet du mont Blanc; enfin Borda, reprenant la question dans toute sa généralité, indiqua les moyens de la résoudre avec une grande approximation; et bientôt après, sa méthode fut employée par M. de Humboldt, dans son voyage d'Amérique, et dans un autre voyage en France, en Prusse et en Italie.

Cette méthode est fondée sur les oscillations nombreuses que fait une aiguille librement suspendue, lorsqu'on l'écarte un peu de sa position, et qu'ensuite on l'abandonne à elle-même. Si elle est régulièrement aimantée, et que l'axe de suspension passe par son centre de gravité, elle oscille par l'effort du couple magnétique de la terre, comme oscillerait séparément chacune de ses moitiés, sollicitée par l'une des forces du couple. Ainsi, elle forme un véritable pendule composé, qui reste parfaitement identique, quand la distribution du magnétisme reste exactement la même dans tous les points de sa substance; car, si le fluide libre éprouvait quelque changement, soit dans sa quantité, soit dans son arrangement, la résultante aurait une autre intensité ou un autre point d'application, et la même aiguille formerait en réalité un pendule différent. Supposant

donc que l'aiguille reste matériellement et magnétiquement la même, une différence dans la durée de ses oscillations ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité des forces qui la sollicitent, et, la pesanteur restant la même, elle ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité de la force magnétique.

Or, sous ces conditions, les intensités de la force et les durées des oscillations sont liées par le principe suivant : que les forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps.

Ainsi, m étant la force magnétique qui agit sur l'aiguille quand elle fait n oscillations dans un certain temps, dans 100″ par exemple, et m' étant la force qui la sollicite quand elle fait n' oscillations dans le même temps de 100″, l'on a

$$\frac{m}{m'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Si, par exemple, on avait trouvé $n = 25$ et $n' = 24$, on aurait

$$\frac{m}{m'} = \frac{625}{576} = 1{,}085,$$

c'est-à-dire que la première force serait à la seconde comme 1,085 est à 1, ou comme 1085 est à 1000.

Pour appliquer cette méthode, on peut faire osciller une aiguille, soit dans le plan du méridien magnétique autour de la ligne d'inclinaison, soit perpendiculairement au méridien magnétique autour de la ligne de déclinaison ; on pourrait même la faire osciller dans d'autres positions, mais l'on n'y trouverait nul avantage.

Oscillations de l'aiguille d'inclinaison. — Puisque le plan du méridien magnétique varie à chaque instant, il faut apporter un grand soin à placer la boussole dans sa vraie direction du moment ; et, puisqu'on doit compter un grand nombre d'oscillations de l'aiguille, il faut aussi porter un grand soin à donner à l'axe toute la mobilité qu'il peut prendre sur ses deux couteaux d'agate. Ces conditions remplies, on écarte l'aiguille de 3 ou 4° de sa position d'équilibre, on l'abandonne à elle-même, et, avec un chronomètre ou une bonne montre à secondes, on compte très-soigneusement le nombre des oscillations qu'elle exécute dans un temps donné. Après quelques

séries d'observations successives, dont on prend la moyenne, on enlève l'aiguille, on la conserve dans un étui avec beaucoup de précautions pour qu'elle ne reçoive aucun choc ou aucune influence magnétique étrangère, et ensuite on peut l'emporter en voyage, pour répéter des expériences pareilles en différents points du globe.

Mais, pour que les résultats puissent inspirer de la confiance, il est nécessaire d'avoir plusieurs aiguilles de cette espèce qui se vérifient l'une l'autre, et même il est convenable de revenir au même lieu les faire osciller encore une fois, pour s'assurer qu'elles ont bien conservé leur magnétisme. Dans la recherche de l'inclinaison, la méthode du retournement (**183**) peut corriger les erreurs qui proviendraient d'une aimantation irrégulière, ou d'un déplacement du centre de gravité : mais, pour les recherches d'intensité, l'aiguille devant rester absolument identique, il faut se garder de l'aimanter en sens contraire, et par conséquent il faut, par tous les moyens de vérification, s'assurer que son magnétisme est régulier et son centre de gravité bien placé.

Oscillations de l'aiguille de déclinaison. — La force qui fait osciller l'aiguille de déclinaison n'est qu'une partie de la force magnétique de la terre, et une partie d'autant plus petite que l'inclinaison est plus grande, tellement qu'aux pôles magnétiques, où l'inclinaison est de 90°, l'aiguille de déclinaison n'a plus de force, ni pour se diriger, ni pour osciller. En général, i étant l'angle d'inclinaison d'un lieu (Pl. 15, Fig. 15), la force terrestre, dont l'intensité est m, se décompose en deux autres par la règle du parallélogramme des forces (**18**) : l'une, verticale, ayant pour valeur $m \sin i$, et qui est détruite par la suspension ; et l'autre horizontale, ayant pour valeur $m \cos i$, qui est seule efficace pour diriger et pour faire osciller l'aiguille de déclinaison. Pour un autre lieu, où l'intensité serait m' et l'inclinaison i' la force horizontale serait $m' \cos i'$, et les deux forces seraient entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations n et n', qu'elles font exécuter à la même aiguille dans le même temps. On aurait donc

$$\frac{m \cos i}{m' \cos i'} = \frac{n^2}{n'^2} \quad \text{ou} \quad \frac{m}{m'} = \frac{n^2 \cos i'}{n'^2 \cos i};$$

c'est-à-dire, qu'ayant observé dans des lieux différents les

nombres d'oscillations n et n' que fait la même aiguille dans le même temps, il faut, pour avoir le rapport des forces magnétiques, multiplier le rapport carré des nombres d'oscillations par le rapport renversé des cosinus d'inclinaison.

Cette méthode d'observation semble avoir quelque avantage sur la précédente : 1° parce qu'il faut un artiste très-habile pour faire une aiguille d'inclinaison tolérablement bonne et bien équilibrée, tandis qu'une aiguille de déclinaison s'équilibre d'elle-même dans la chape de papier où elle est suspendue; 2° parce que les couteaux d'agate et l'axe de l'aiguille d'inclinaison offrent beaucoup plus de frottement que le fil de soie sans torsion qui suspend l'aiguille de déclinaison. Cependant, il y a dans les oscillations horizontales une source d'erreur inévitable : l'un des pôles de l'aiguille ayant une tendance à plonger au-dessous de l'horizon, il en résulte que le prolongement du fil de suspension ne passe jamais par le centre de gravité; de là une différence dans les deux bras de levier de l'aiguille horizontale, et une différence qui change avec l'inclinaison. Il est d'autant plus nécessaire de signaler cette cause d'erreur qu'elle a échappé aux plus habiles observateurs, bien qu'elle soit assez influente pour rendre tout à fait incomparables les observations faites en des lieux où l'inclinaison est très-différente.

On voit (Pl. 16, Fig. 19, 20) la boussole d'intensité de M. Gambey : la caisse ronde est de bois; elle se couvre d'un verre, et en outre elle est percée de deux fenêtres rondes opposées pour viser à l'index i de l'aiguille au moyen de la lunette l.

En discutant les observations d'intensité qui ont été faites en différents points de la terre, soit en Europe, soit en Amérique, soit dans les îles de l'Océan, de la mer des Indes ou de la mer Pacifique, on arrive à ce résultat général, que l'intensité est la plus petite vers l'équateur magnétique, et qu'elle va en augmentant à mesure qu'on s'en éloigne vers le nord ou vers le sud. Il paraît que vers les pôles elle serait environ une fois et demie aussi grande qu'à l'équateur. Dans le même lieu elle paraît changer aussi avec les variations diurnes; mais les différences très-petites qu'elle éprouve demandent à être constatées par de nouvelles observations.

189. De l'action de la terre sur le fer doux. — La terre exerce une action continuelle sur toutes les substances qui con-

tiennent du magnétisme ; elle agit comme un vaste aimant qui fait sans cesse effort pour attirer ou repousser les fluides décomposés, et pour décomposer les fluides naturels. Les différents corps magnétiques répandus sur la surface du globe résistent plus ou moins à cette puissance universelle, suivant l'intensité de leur force coercitive, mais tous en éprouvent quelque modification. Le fer doux est, sous ce point de vue, le corps le plus curieux à étudier, puisqu'il n'offre aucune résistance à la séparation de ses fluides, et qu'il ne conserve rien des actions magnétiques qu'il a subies. Les expériences suivantes nous donneront une idée des phénomènes qu'il présente.

Une barre de fer doux d'environ 1 mètre de longueur est mise en présence d'une petite aiguille d'épreuve (Pl. 15, Fig. 12).

Quand la barre est tenue verticalement, ou à peu près dans la direction de l'inclinaison, elle prend un pôle austral à son extrémité inférieure e, et un pôle boréal à son extrémité supérieure e'. C'est ce qu'il est facile de voir par les actions attractives et répulsives qu'elle exerce sur l'un ou l'autre pôle de l'aiguille lorsqu'on la fait glisser, de haut en bas ou de bas en haut, pour amener successivement en presence toutes les parties de sa longueur.

Pour s'assurer que le fer est sans force coercitive, et que c'est bien l'action terrestre qui décompose son magnétisme, il suffit de retourner rapidement la barre, l'extrémité e en haut et l'extrémité e' en bas ; alors le pôle austral reste en bas, et le pôle boréal en haut : le second est cette fois en e, et le premier en e'. Ainsi, les fluides ont été instantanément recomposés par leur action mutuelle, et instantanément décomposés en sens inverse par l'action terrestre.

Ce qui se manifeste d'une manière si frappante sur une barre d'une certaine longueur se manifeste avec moins d'intensité sur une pièce plus courte dans le sens de l'inclinaison : c'est pourquoi l'effet semble à peu près nul lorsqu'on tient la barre horizontalement, et surtout dans une position perpendiculaire au méridien magnétique.

Sous l'influence de l'aimant terrestre, tous les corps magnétiques deviennent donc de véritables aimants, mais des aimants à pôles mobiles et changeants, de telle sorte qu'il suffit de les retourner de haut en bas pour que leurs pôles se renversent, et de varier un peu leur position pour que leurs pôles éprouvent

quelques déplacements dans l'intérieur de leur substance. Ce résultat nous indique combien il y a de précautions à prendre lorsqu'on veut faire avec les boussoles des observations exactes; car le fer, qui entre dans la construction des édifices, agit de deux manières sur les aiguilles aimantées : il agit par la décomposition magnétique qu'il éprouve de la part de l'aiguille elle-même, et il agit surtout par les fluides libres que la terre y maintient dans un état permanent de séparation. Avec quelques soins, l'on peut aisément reconnaître les perturbations locales qui résulteraient de cette cause; car dans un espace un peu considérable, dans une lieue carrée par exemple, l'action terrestre ne produit en général que quelques minutes de différence, soit dans l'inclinaison, soit dans la déclinaison.

190. Des causes mécaniques et chimiques qui ont une influence sur la force coercitive. — Lorsqu'une barre de fer doux est soumise à l'action magnétique de la terre, il suffit de la frapper de quelques coups de marteau à l'une ou l'autre de ses extrémités, pour fixer au moins en partie les fluides décomposés par lesquels elle agit sur l'aiguille. Après la percussion, elle est un aimant à pôles fixes, et de quelque côté qu'on la retourne, le même fluide se montre toujours à la même extrémité. Ainsi, la percussion donne au fer doux de la force coercitive; cette force est sans doute locale et n'existe que dans les molécules qui ont reçu le choc, car en retournant la barre, et en la frappant dans cette position inverse de la précédente, on parvient à l'aimanter en sens contraire. On peut ainsi renverser ses pôles autant de fois que l'on veut; et, ce qui est encore digne de remarque, c'est qu'après quelques jours, ou quelquefois même après quelques heures, la force coercitive a disparu, et il faut de nouveaux chocs pour la reproduire.

Cette expérience curieuse donne la clef d'un grand nombre de phénomènes, sur lesquels j'insisterai d'autant plus volontiers que personne, à ma connaissance, n'en a donné la véritable explication. Tout le monde sait que les substances magnétiques sont presque toujours dans un état d'aimantation plus ou moins marqué. C'est un certain Jules César, chirurgien de Rimini, qui observa le premier la transformation du fer en aimant; il fit cette remarque, vers 1590, sur une barre de fer qui avait soutenu quelque construction en brique sur le sommet d'une tour de l'église de Saint-Augustin. Plus tard, vers 1630, Gassendi

fit la même observation sur la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix, qui était tombée frappée de la foudre ; il en trouva le pied consumé par la rouille et jouissant de toutes les propriétés de l'aimant. Depuis cette époque, les observations se sont multipliées, et l'on a reconnu qu'un morceau de fer un peu rouillé est presque toujours un aimant plus ou moins fort ; qu'il en est de même de la fonte, de l'acier et des autres substances magnétiques ; enfin, l'on a reconnu que la rouille, ou l'oxydation, n'est pas du tout nécessaire pour qu'un corps s'aimante, et qu'il suffit pour cela de lui faire subir quelque action mécanique, de le tordre, de le battre, de le limer ou de le tourmenter de quelque manière : par exemple, dans la boutique d'un serrurier, tous les outils sont des aimants, et il n'est pas rare que les aiguilles, les instruments tranchants et les autres objets d'acier présentent des traces de magnétisme polaire. Dans tous ces phénomènes, ce n'est ni l'action chimique ni l'action mécanique qui magnétisent les corps : mais c'est l'action de la terre, sans cesse agissante, qui décompose les fluides, et, la décomposition une fois faite, elle est maintenue par la force coercitive, qui résulte des déplacements chimiques ou mécaniques qu'éprouvent les molécules. Pour m'en assurer par l'expérience, il m'a suffi de comparer les quantités de magnétisme que prennent les corps, suivant la position qu'on leur donne, par rapport à la direction de la force terrestre. Dans une position verticale, ils s'aimantent fortement par l'oxydation ou par les actions mécaniques, et le pôle austral est toujours en bas. Dans des positions plus obliques, l'effet est moindre, mais toujours dans le sens voulu par le pôle boréal de la terre, qui est le pôle dominant dans nos climats. On peut même, d'après cette donnée, fabriquer de toutes pièces des aimants très-puissants, soit avec du fil de fer, soit avec des barres de fer ou d'acier. Pour aimanter des fils de fer sans aimant, il suffit d'en couper trente ou quarante bouts, de la longueur de 30 ou 40 centimètres par exemple, et, en les tenant verticalement, de les tordre sur eux-mêmes, un à un, jusqu'à les rendre roides et cassants : chacun d'eux devient fortement magnétique, et on les réunit ensuite pour en former des faisceaux, avec lesquels on aimante les plus gros barreaux par des procédés que nous ferons connaître. Pour aimanter sans aimant des barres de fer ou d'acier, il suffit de battre les premières en les tenant verticalement ; et pour les secondes, il

suffit de les frotter dans le même sens avec une barre de fer verticale.

Les aimants naturels n'étant que des oxydes de fer, il est probable qu'ils doivent leurs propriétés magnétiques à l'action de la terre qui s'est exercée sur eux au moment de leur formation. Car les mines de fer qui existent de nos jours ne sont pas aussi anciennes que le monde, et, sans admettre qu'à l'origine le fer fût dans son état pur et métallique, il est certain que les combinaisons dans lesquelles il est engagé à la surface du globe et dans toute l'étendue de la croûte que nous exploitons, ne furent pas toujours ce qu'elles sont aujourd'hui. Le travail chimique qui s'accomplit sans cesse, et qui sans cesse se renouvelle depuis tant de siècles dans les entrailles de la terre, fait passer les molécules les plus inertes par une foule de combinaisons différentes et change de mille manières leurs agrégations primitives. Les mines magnétiques sont soumises à des mutations perpétuelles comme les autres éléments pondérables, et l'on peut dire avec certitude qu'à chaque instant il y en a qui se décomposent, qu'à chaque instant il y en a d'autres qui se forment et dont les pôles sont arrangés suivant les lois voulues par le magnétisme général de la terre.

Telle est sans doute la cause première qui a développé du magnétisme dans les aimants naturels, soit dans ceux que possèdent les Chinois depuis plus de trois mille ans, soit dans ceux qui furent observés par Pythagore et Platon, soit dans ceux que nous exploitons aujourd'hui et qui servent à nos recherches.

Il n'y a donc, à notre connaissance, que du magnétisme développé qui puisse développer le magnétisme.

Cette conclusion a été rigoureuse jusqu'à la découverte de l'électro-magnétisme, qui a ouvert un nouveau champ dans les sciences en démontrant, comme nous le verrons dans l'une des sections suivantes, que l'électricité aussi peut développer du magnétisme.

191. De l'action de la terre sur le fer des vaisseaux, et des moyens de corriger la déviation que la boussole en éprouve.—De grandes masses de fer sont employées dans nos vaisseaux : les unes font partie de sa construction et restent fixes; les autres font partie de l'armement et sont plus ou moins mobiles, comme les canons de fer ou de fonte, les ancres, les câbles, les barriques et les outils de toute espèce. Tous ces corps

magnétiques, dispersés çà et là dans les différentes parties du bâtiment, doivent exercer sur la boussole et exercent en effet une action considérable. Les déviations produites par cette cause méritent toute l'attention des physiciens; elles s'élèvent quelquefois à 15 ou 20°, et fussent-elles 15 ou 20 fois moindres, elles seraient encore plus que suffisantes pour exposer les navigateurs à de grands dangers.

Il paraît que c'est Wales, astronome de l'expédition de Cook, qui a, le premier, signalé cette source d'erreurs dans les observations à la mer : plus tard, leur véritable cause fut indiquée par Downie, et c'est le capitaine Flinders, célèbre par ses découvertes et par son intrépidité, qui fit le premier quelques essais heureux pour s'en mettre à l'abri. Il y a quelques années, M. Bain a rappelé l'attention sur ce point important ; plusieurs officiers de la marine anglaise en ont fait l'objet de leurs recherches, et le professeur Barlow de Woolwich a été couronné par la Société Royale de Londres pour les heureux résultats auxquels il a été conduit en s'occupant de cette question. C'est l'ouvrage de M. Barlow qui nous servira de guide dans ce que nous allons dire.

Dans un vaisseau, l'aiguille de la boussole peut être déviée : 1° par les décompositions du fluide qu'elle excite elle-même dans les substances magnétiques; 2° par l'état magnétique permanent que ces substances peuvent avoir en vertu de leur force coercitive ; 3° par l'état magnétique passager qu'elles prennent sous l'influence de l'aimant terrestre.

La première cause ne peut produire que de faibles effets ; et l'on s'en garantit sûrement en plaçant l'*habitacle* à une distance assez grande de toutes les pièces de fer, ce qui est toujours possible.

La seconde cause aurait un remède facile, car l'aiguille aimantée se trouvant placée, à l'égard des divers pôles ou centres magnétiques du vaisseau, à une distance très-grande par rapport à sa longueur, il en résulte que chacun de ces centres agit sur elle par un couple. Par la composition de tous ces couples partiels, on aurait donc un couple résultant qui resterait toujours le même dans tous les climats et pour toutes les positions du vaisseau. Ce couple, à son tour, se composerait avec le couple terrestre, et c'est là ce qui produirait la déviation de l'aiguille. Mais dans le même lieu, quand le vaisseau tournerait sur lui-

même autour d'un axe vertical, le couple terrestre conservant la même direction dans l'espace, et le couple du vaisseau tournant avec lui, on voit qu'il en résulterait une déviation variable, susceptible d'un maximum à droite du méridien magnétique, et d'un autre maximum égal à sa gauche; de telle sorte que la moyenne entre ces deux positions extrêmes de l'aiguille donnerait sa vraie direction. Pour d'autres latitudes, le couple terrestre serait plus intense ou plus oblique; mais la déclinaison se trouverait encore de la même manière, par la rotation complète du vaisseau autour d'un axe vertical.

Enfin, la troisième cause est plus puissante que les deux premières, et ses effets, sans cesse variables, sont aussi plus difficiles à apprécier et à corriger. Nous allons pour un moment supposer qu'elle agisse seule pour dévier l'aiguille aimantée. Alors il est clair que tous les corps magnétiques du vaisseau deviennent des aimants à pôles changeants; quand le vaisseau tourne sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, ces corps se présentent autrement à l'action de la terre, et éprouvent de sa part des décompositions différentes. Ces phénomènes, déjà si compliqués dans le même lieu, se compliquent encore, quand le vaisseau, sillonnant les mers, passe successivement dans des contrées où le couple terrestre change de direction ou d'intensité. Tous ces effets divers ne peuvent être ni prédits ni même indiqués par la théorie, et ce n'est que par des essais plus ou moins ingénieux que l'on peut les neutraliser. Voici les moyens que propose M. Barlow pour y parvenir.

Le bâtiment étant dans une rade tranquille où l'on peut le virer de bord, on choisit à quelque distance sur le rivage un lieu d'où l'on puisse l'apercevoir dans toutes les positions qu'il prend en tournant sur lui-même. Là s'établit un observateur avec une boussole et un théodolite, ou quelque autre instrument propre à mesurer les angles. Sur le vaisseau, près de la boussole déjà fixée dans l'habitacle, est un autre observateur, ayant aussi un instrument pareil. A un signal donné, les observateurs visent l'un à l'autre, et chacun d'eux détermine l'angle de son aiguille avec l'axe de sa lunette. Puisque les observateurs se regardent, les axes des deux lunettes ne font qu'une seule et même ligne, que nous appellerons la *ligne centrale*.

Or, la boussole du rivage n'éprouvant point de perturbation, il est évident que, si la boussole du vaisseau n'en éprouvait pas,

les deux aiguilles seraient parallèles et feraient le même angle avec la ligne centrale, car la distance de quelques centaines de mètres qui se trouve entre elles ne peut pas produire de changement sensible dans la déclinaison. Donc, la différence de ces angles est la déviation produite par les corps magnétiques du vaisseau à l'instant de l'observation. Concevons que, par des manœuvres qui sont toujours faciles pendant le calme, on fasse faire au vaisseau une révolution complète, et qu'à chaque rumb de vent qu'il parcourt, ou à chaque angle de 10 ou 12° dont il tourne, on fasse une observation pareille à la précédente; alors, on aura pour chacune de ces positions la valeur de la déviation locale produite par les corps magnétiques dont il est chargé. On pourrait ensuite, s'il était nécessaire, trouver, par des interpolations, les déviations correspondantes à chaque degré.

Cette première opération terminée, l'observateur du rivage enlève sa boussole, et à sa place il substitue celle du vaisseau, en la posant, au même point, sur une espèce de cage en bois, qui peut faire une révolution complète autour de la verticale du pivot de l'aiguille. Cette cage est représentée (Pl. 16, Fig. 18). Sur l'un des côtés on voit, de distance en distance, des trous qui sont destinés à recevoir le *compensateur magnétique;* nous appellerons ainsi l'appareil qui doit corriger ou faire connaître la déviation produite par le fer du vaisseau.

Le *compensateur magnétique* se compose d'une tige *t*, en cuivre rouge, de 1 pouce et $\frac{1}{2}$ de diamètre, et de deux plaques de fer *ff'*, de 12 ou 13 pouces de diamètre (mesures anglaises), d'une épaisseur telle que le pied carré pèse 3 livres. Ces deux plaques sont séparées par une feuille de carton, et pressées l'une contre l'autre au centre par l'écrou extérieur de la tige de cuivre, et sur les bords par trois petits écrous en fer; voilà tout l'appareil : on le dispose comme il est représenté dans la figure 18. Alors, la cage en bois emportant le compensateur dans son mouvement de rotation, l'aiguille de la boussole en est affectée diversement dans les différents azimuts, et, par des tâtonnements, on arrive enfin à lui faire éprouver de la sorte toute la série des déviations qu'elle éprouvait sur le vaisseau. Cela fait, on marque soigneusement la position du centre de la plaque par rapport à l'aiguille de la boussole, et quand celle-ci a repris sa place sur le vaisseau, on ajuste le compensateur sur le

pied qui la porte (Fig. 17), de manière qu'il ait à son égard exactement la même position.

Par ce moyen, la déviation semble doublée, et non pas corrigée, puisque le compensateur produit un effet justement égal à celui que produit le fer du vaisseau, et dans le même sens. Elle est doublée, en effet, et c'est là ce qui donne le moyen de la trouver. D'abord on enlève le compensateur pour faire une première observation de déclinaison, et l'on trouve, par exemple, 36° à l'ouest. Ensuite on place le compensateur pour faire une seconde observation, et l'on trouve, par exemple, 40° à l'ouest. Ce second résultat étant plus fort que le premier, c'est une preuve que les actions locales augmentent la déclinaison. La différence $40 - 36 = 4$ fait voir que le compensateur, pour sa part, l'augmente de 4°; donc le fer du vaisseau l'augmente d'autant; ainsi, la vraie déclinaison est $36^{\circ} - 4^{\circ} = 32^{\circ}$. Au contraire, si l'observation faite avec le compensateur donnait un moindre résultat, ce serait une preuve que les actions locales diminuent la déclinaison, et la différence des deux observations devrait s'ajouter à la première pour avoir la déclinaison du lieu. Il faut donc dans tous les cas suivre cette règle générale : faire deux observations, l'une sans compensateur, l'autre avec le compensateur; retrancher la seconde de la première, et, cette différence, *prise avec son signe*, étant ajoutée à la première observation, le résultat sera la déclinaison cherchée.

Cet ingénieux procédé n'est pas sans difficulté dans la pratique.

192. De l'influence du magnétisme sur la marche des chronomètres. — Plusieurs marins, habiles observateurs, ont remarqué que leurs chronomètres n'avaient pas la même marche à bord et sur le rivage. Les différences s'élèvent quelquefois de 5″ à 10″ par jour. On conçoit de quelle importance est ce phénomène, puisque toute l'exactitude des observations nautiques et géographiques que l'on peut faire à la mer est dépendante de l'exactitude avec laquelle on mesure le temps. Les chronomètres ayant dans leur construction plusieurs pièces d'acier, et surtout des pièces mobiles qui sont emportées par le balancier, il est naturel de supposer qu'ils sont par là soumis aux influences magnétiques. En effet, la proximité d'un aimant suffit pour altérer leur marche; de nombreuses expériences en ont donné la preuve,

et l'on a reconnu aussi que des masses de fer doux, aimantées par la terre, produisent le même phénomène. Sur un vaisseau, c'est donc la même cause qui dévie la boussole et qui trouble la marche des chronomètres; aussi a-t-on essayé de la neutraliser dans les deux cas par le même moyen : mais, pour les chronomètres, ce qu'il y a jusqu'à présent de meilleur à faire, c'est de les tenir au même lieu, dans la même position, et le plus loin qu'il soit possible de toute substance magnétique.

CHAPITRE III.

Des Lois et de la Théorie du magnétisme.

193. Divers moyens de comparer les forces magnétiques. —Le premier moyen qui se présente pour estimer les forces relatives des aimants naturels ou artificiels, consiste à les mettre en contact avec une même pièce de fer que l'on charge ensuite de poids graduellement croissants jusqu'à l'instant où elle se détache, entraînée par le poids total, qui est alors la limite de ce que la force magnétique peut porter. Ce moyen ne peut donner qu'une grossière approximation : l'insuffisance en fut bientôt reconnue, et cependant il fut à peu près le seul dont on fit usage jusqu'en 1780.

A cette époque, Coulomb, par ses belles découvertes, ouvrit de nouvelles routes dans la science, et il donna enfin des méthodes sûres pour mesurer, avec le dernier degré de précision, tous les effets des puissances magnétiques. Dans ce qui va suivre, nous aurons recours aux Mémoires qu'il publia sur ce sujet (tom. IX des *Savants étrangers*, *Mémoires de l'Académie*, 1784, 1785, 1789; *Mémoires de l'Institut*, tom. IV et VI).

Coulomb a employé deux moyens différents pour mesurer la force des aimants : 1° les *oscillations* d'une aiguille suspendue à des fils de soie plate; 2° la *torsion* des fils de cuivre ou d'argent disposés dans un appareil qu'il nommait *balance de torsion*, et qu'on appelle aujourd'hui *balance de Coulomb*.

194. Oscillations. — Nous avons déjà dit qu'un aimant qui oscille sous l'influence magnétique de la terre peut être assimilé à un pendule composé; d'où il suit que, pour trouver la valeur absolue de la force qui le sollicite, il suffirait de connaître son moment d'inertie par rapport à l'axe de suspension, la position exacte de ses pôles ou des centres magnétiques, et le nombre des oscillations qu'il fait dans un temps donné. Mais la force absolue en vertu de laquelle un aimant accomplit ses oscillations, est un élément complexe dépendant à la fois de l'intensité du magnétisme qu'il possède et de l'intensité du magnétisme que

possède le corps qui agit sur lui; car l'une ou l'autre de ces intensités devenant double, par exemple, la force résultante serait double aussi, et elle deviendrait quadruple si les deux intensités étaient l'une et l'autre doublées.

Faute de pouvoir déterminer une intensité magnétique d'une manière absolue, nous sommes réduits à comparer entre elles les résultantes totales qui impriment le mouvement. Alors, le problème devient plus simple : les changements d'intensité n'apportant pas de changements sensibles dans la position des pôles, l'axe de rotation reste invariable ainsi que les moments d'inertie, et il est permis en conséquence de s'appuyer sur ce principe, que *les forces magnétiques qui sollicitent un aimant sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations qu'il exécute dans un temps donné.* D'après cela, nous pouvons comparer les forces magnétiques que possède un corps, soit qu'il puisse osciller lui-même, soit qu'il doive rester fixe dans des positions déterminées.

1° Pour constater l'état magnétique d'une aiguille, on la suspend horizontalement dans une chape de papier ou de métal à un assemblage de fils sans torsion, et l'on compte le nombre n des oscillations qu'elle exécute dans un temps donné, dans 10′ par exemple, sous l'influence de la force de la terre; ensuite, si, par des moyens quelconques, on a changé son intensité, *sans toutefois changer la position de ses pôles*, et que l'on veuille comparer ce second état au premier, il suffit de la suspendre de la même manière, et de compter de nouveau le nombre n' des oscillations qu'elle fait dans le même temps de 10′ : le rapport de ces deux intensités magnétiques m et m' sera donné par la proportion

$$\frac{m}{m'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Ce résultat suppose que l'action de la terre a été la même dans les deux cas, ce qui est sensiblement vrai quand on opère dans le même lieu et à des époques qui ne sont pas très-éloignées.

2° Pour comparer les divers degrés de force d'un aimant qui ne peut être suspendu pour osciller lui-même, on le fait agir, dans ses différents états magnétiques, sur une petite aiguille d'épreuve ayant une grande force coercitive, de peur que son magnétisme ne soit décomposé par influence; mais d'abord on con-

state l'état de cette aiguille, soumise à l'action seule de la terre. Soit n le nombre des oscillations qu'elle fait dans un temps donné, par l'effet de la composante horizontale m du magnétisme terrestre; soit n' le nombre des oscillations qu'elle fait dans le même temps, sous l'influence de la terre et de l'aimant, m' étant alors la somme des composantes horizontales qui agissent sur elle; soit n'' le nombre des oscillations qu'elle fait, toujours dans le même temps, pour un autre état de l'aimant, m'' étant la somme des composantes horizontales correspondantes.

Pour la première et la seconde expérience, on aura

$$\frac{m'}{m} = \frac{n'^2}{n^2};$$

pour la première et la troisième, on aura

$$\frac{m''}{m} = \frac{n''^2}{n^2}.$$

Mais, en supposant que l'aimant dont on cherche la force soit placé, dans les deux cas, de manière que sa composante horizontale soit aussi dans le méridien magnétique, et conspirante avec celle de la terre, il est évident que sa force est dans le premier cas $m' - m$, et dans le second cas $m'' - m$: or, la première et la seconde équation donnent respectivement

$$\frac{m' - m}{m} = \frac{n'^2 - n^2}{n^2}; \quad \frac{m'' - m}{m} = \frac{n''^2 - n^2}{n^2};$$

d'où l'on tire

$$\frac{m' - m}{m'' - m} = \frac{n'^2 - n^2}{n''^2 - n^2}.$$

Tel est le rapport des deux composantes horizontales de l'aimant dans les deux états ou dans les deux positions successives où il a été placé par rapport à l'aiguille.

195. Balance de torsion. — Lorsqu'un fil de métal est tendu verticalement par un certain poids, il prend une position d'équilibre, et, si l'on fait tourner le poids sur lui-même d'une ou de plusieurs révolutions, ou seulement d'un angle de quelques degrés, le fil éprouve une torsion dans toute sa longueur, et il fait un effort pour revenir sur lui-même et pour ramener le poids à sa position primitive.

Coulomb a étudié le premier cette force de torsion, et nous allons énoncer les lois remarquables auxquelles il a été conduit; nous reviendrons sur ce sujet dans le livre des *Actions moléculaires*.

1° La force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion;

2° Elle est, dans un même fil, en raison inverse de sa longueur et indépendante de sa tension;

3° Pour des fils de même substance et de différente épaisseur, elle est proportionnelle à la quatrième puissance des diamètres.

Ces lois ont été vérifiées sur les cheveux, sur la soie et sur les fils d'argent, de fer et de laiton, de différents diamètres.

La balance dans laquelle on mesure la force magnétique, par cette force de torsion, est representée (Pl. 16, Fig. 14, 15, 16). La figure 14 représente tout l'appareil mis en expérience; la figure 15 est une coupe horizontale correspondant à l'extrémité inférieure du fil, et la figure 16 représente le *micromètre* supérieur. Ce micromètre est composé de la manière suivante : ss' est une plaque circulaire qui termine le cylindre ll', elle est percée en son centre d'une large ouverture o; mm' est un disque mobile s'appliquant exactement sur la plaque ss' tournant sur elle à frottement très-doux, et maintenu dans son mouvement de rotation par une petite douille qui s'élève du milieu de ss'; vers le centre c du disque mm' est un trou triangulaire dont l'un des angles aboutit exactement au centre; c'est dans cet angle que passe le fil fl; de là il vient s'attacher au treuil t, qui est supporté par deux pièces fixes p et p' sur lesquelles il peut tourner. La plaque ss' est divisée sur tout son contour, et le disque mm' porte un point de repère qui parcourt ces divisions, et qui indique par conséquent les divers degrés de torsion que l'on donne au fil à son extrémité supérieure.

Dans la figure 14 on voit la pince qui s'attache à l'extrémité inférieure du fil; elle porte une espèce d'étrier en cuivre mince dans lequel on met les aiguilles aimantées, et, pour éviter les oscillations trop prolongées, on adapte à l'étrier un volant qui plonge dans un vase rempli d'eau. Sur le contour de la cage, on colle une bande de papier portant des divisions de degré en degré, dont la grandeur est déterminée par le prolongement des rayons, tel que cr, cr', etc. (Fig. 16). Le fil doit occuper le centre de ces divisions, et cette condition est remplie quand un rayon visuel quelconque tombe sur deux divisions diamétrale-

ment opposées, par exemple, sur 0 et 180, sur 90 et 270, etc.

La balance étant ajustée, on détermine la position d'équilibre du fil, en plaçant dans l'étrier une aiguille non aimantée, ensuite on y place une aiguille aimantée, de même poids, et l'on tourne le micromètre supérieur dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que le plan d'équilibre du fil coïncide avec la direction de cette aiguille; alors, on est sûr qu'elle est dans le méridien magnétique, et que le fil est sans torsion. Supposons maintenant que l'on tourne le micromètre pour écarter l'aiguille de sa position, pour la porter, par exemple, en *ca'* (Fig. 16); de manière qu'elle forme avec le méridien *mm'* un angle *aca'* de 20°. Soit 180° l'angle dont on le tourne; le fil à son extrémité inférieure n'ayant marché que de 20°, la torsion qui lui reste est 180° — 20° ou 160°; c'est cette force qui fait équilibre à la *force directrice* de la terre, c'est-à-dire à la composante horizontale qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. Soit *m* l'intensité de la force horizontale terrestre *fa'*; elle peut se décomposer en deux : l'une *pa'* qui se détruit, ou du moins qui ne fait pas tourner l'aiguille; et l'autre *ta'*, qui est tout entière efficace; la valeur de celle-ci est $m \sin v$, en représentant par v la *déviation aca'*. Au-dessous de 15 à 20° les angles peuvent sensiblement être pris pour les sinus, et, dans ces limites, la force directrice est donc exprimée par mv.

Dans l'exemple qui nous occupe, $v = 20°$; ainsi $20° m$ est la force qui est balancée par une torsion de 160°; et, puisque la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, il en résulte enfin que, pour 1° de déviation, la force directrice serait seulement de $\frac{160}{20} = 8$. En général, nous ramènerons ainsi la force directrice à 1° de distance.

La même aiguille ayant reçu une autre quantité de magnétisme, il faudrait, par exemple, tourner le micromètre de 495° pour l'écarter de 15°; sa force directrice serait alors $\frac{495-15}{15} = \frac{480}{15} = 32$; elle serait donc exactement quadruple de ce qu'elle était dans la première expérience.

Pour déterminer la force d'un aimant qui ne peut être lui-même horizontalement suspendu dans la balance, on le fait agir sur l'aiguille de l'expérience précédente, et, pour plus de simplicité, on le dispose de manière que son centre d'action tombe sensiblement en *a* (Fig. 16). Alors, on tourne le micromètre pour obtenir une déviation moindre que 20°, et il est facile de

voir comment les expériences s'achèvent, soit que l'aimant qu'on éprouve agisse par attraction, soit qu'il agisse par répulsion. Dans le premier cas, la force directrice est la somme des actions de la terre et de l'aimant; dans le second cas, elle est leur différence.

196. Les attractions et les répulsions magnétiques sont en raison inverse du carré de la distance. — Cette loi fondamentale du magnétisme avait été soupçonnée par quelques physiciens, mais c'est Coulomb qui en a le premier donné la démonstration rigoureuse par les deux méthodes dont nous venons de parler.

1° ***Par les oscillations.*** Une petite aiguille d'épreuve, suspendue à un fil de cocon, est mise à l'abri des agitations de l'air; elle fait 15 oscillations par 1′. Soit m la force horizontale de la terre qui la sollicite : on fait agir sur elle le pôle attractif d'un long fil d'acier, fortement aimanté, et maintenu verticalement dans le plan du méridien magnétique.

Par des expériences préparatoires on reconnaît que, pour obtenir le plus grand effet possible, il faut que l'extrémité agissante du fil d'acier *dépasse* de 30 millimètres environ le plan horizontal de l'aiguille; on supposera donc que le fil est ainsi disposé.

Dans une première expérience, l'aiguille étant à 4 pouces de distance du fil, elle fait 41 oscillations en 1′; soit m' la force qui agit sur elle.

Dans une deuxième expérience, l'aiguille étant à 8 pouces de distance, elle fait 24 oscillations en 1′; soit m'' la force qui agit sur elle. On a

$$\frac{m'}{m}=\frac{(41)^2}{(15)^2},\quad \frac{m''}{m}=\frac{(24)^2}{(15)^2}.$$

La force horizontale du fil est $m'-m$ dans la première expérience, et $m''-m$ dans la seconde, et il résulte des deux équations précédentes :

$$\frac{m'-m}{m''-m}=\frac{(41)^2-(15)^2}{(24)^2-(15)^2}=\frac{1456}{351}=4,1.$$

Ainsi, dans la deuxième expérience, où la force est à une distance double, son intensité est à peu près quatre fois plus petite.

Pour de plus grandes distances on trouve la même loi, pourvu

qu'on ait soin de corriger les résultats de l'influence du pôle répulsif du fil, qui devient alors sensible.

2° ***Par la torsion.*** Il faut aussi, dans cette méthode, employer des fils très-longs, afin d'éviter l'influence des pôles qui ne sont pas en présence. Les fils de Coulomb avaient 24 pouces de longueur, sur 1 ligne $\frac{1}{2}$ de diamètre. Celui de ces fils qui était dans la balance avait une force directrice de 35° de torsion pour 1° de distance (**195**); un second fil pareil, et aussi très-fortement aimanté, fut placé verticalement dans la balance, son pôle répulsif en bas, et son extrémité inférieure tombant à un pouce environ au-dessous du niveau de l'autre; de telle sorte que, si le premier n'eût pas été repoussé, leur point de *recoupement* ou de croisement se serait trouvé à un pouce des extrémités de chacun. Mais le fil suspendu fut chassé vivement, et il ne s'arrêta qu'à 24° du méridien magnétique; c'est ce que nous appelons sa première position. Pour lui en donner une deuxième, le micromètre supérieur fut tourné de trois circonférences, ou 1080°, et le fil se rapprocha à 17° du méridien. Enfin, pour lui en donner une troisième, le micromètre fut encore tourné de cinq circonférences, ce qui fait en tout huit circonférences ou 2880°, et cette fois il se rapprocha à 12° du méridien.

Dans la première position, l'aiguille suspendue était rappelée dans le méridien par la force terrestre, et par la torsion de 24° du fil. Or, la force terrestre étant, comme nous avons dit, de 35° de torsion pour 1° d'écart, pour 24° elle était de 840°, qui donnent, ajoutés à 24, une force totale de 864°.

Dans la deuxième position, elle était rappelée par la force terrestre agissant à 17°, et équivalant par conséquent à $35 \times 17 = 595°$ de torsion; et par la torsion du fil qui était de $1080 + 17 = 1097$, ce qui fait 1692.

Dans la troisième position, elle était rappelée par la force terrestre agissant à 12°, et équivalant à $35 \times 12 = 420$; et par la torsion qui était de $2880 + 12 = 2892$, ce qui fait 3312.

Ainsi, les distances étant 24, 17 et 12, les forces répulsives correspondantes sont 864, 1692 et 3312, ce qui donne à très-peu près la raison inverse du carré des distances.

Il est facile de voir comment la même méthode conduirait à déterminer la loi des attractions.

Ces forces, sur lesquelles nous venons d'opérer, sont, il est vrai, des résultantes de toutes les actions partielles du magné-

tisme des aimants et du magnétisme de la terre ; mais comme, des attractions planétaires qui s'exercent sur des masses prodigieuses, on a pu déduire les actions de toutes les molécules de la matière pondérable, de même pour les fluides magnétiques nous pouvons conclure que la loi des résultantes que nous observons est véritablement la loi élémentaire suivant laquelle toutes les parcelles de substance magnétique se sollicitent mutuellement. Ainsi, nous sommes conduits à cette vérité qui doit être le fondement de toute théorie, savoir, que les molécules du même fluide se repoussent, et que les molécules de fluides contraires s'attirent en raison inverse du carré de la distance.

197. Distribution du magnétisme dans les aimants de différentes formes, et détermination des pôles. — Les deux méthodes qui viennent de nous conduire à la découverte des lois attractives et répulsives du magnétisme peuvent nous servir encore à la détermination des intensités magnétiques en chaque point d'une aiguille aimantée.

Une petite aiguille d'épreuve (Pl. 15, Fig. 25), de 15 à 20mm de longueur, suspendue à un fil de cocon, fait n oscillations en 1′, sous l'influence de la force m, composante horizontale de la terre. On lui présente, à la distance de 8 à 10 millimètres, un fil aimanté vertical ab (Fig. 24), qui ne la détourne point du méridien, mais qui la fait osciller plus vivement ; elle exécute alors n' oscillations en 1′. Soit m' la force qui la sollicite. A une petite distance, la section s' qui se trouve vis-à-vis l'aiguille, et les sections voisines, telles que a' et b', agissent avec toute leur énergie, tandis que les autres agissent avec une obliquité toujours croissante, et par conséquent avec une force toujours moindre. Nous pouvons donc considérer la force actuellement agissante de l'aimant comme appartenant à la section s'. De même, si nous présentons l'aiguille à la même distance, vis-à-vis la section s'', nous aurons n'' oscillations en 1′ ; m'' étant la force qui produit cet effet, ce qui donne

$$\frac{m'-m}{m''-m}=\frac{n'^2-n^2}{n''^2-n^2}.$$

Les forces $m'-m$ et $m''-m$ sont les intensités magnétiques de l'aimant, pour les points qui sont en présence de l'aiguille, et nous pouvons de la sorte comparer les intensités des différentes tranches dans toute la longueur des fils ou des barreaux

aimantés. Seulement, quand on arrive vis-à-vis de l'extrémité *a*, il faut doubler l'effet obtenu, puisqu'on aurait visiblement un effet double, si l'aimant se continuait encore et donnait au-dessous de *a* des tranches aussi efficaces que celles qui sont au-dessus. On peut exprimer géométriquement ces résultats en élevant sur les diverses tranches des perpendiculaires qui représentent les intensités observées. Les extrémités de ces perpendiculaires formeront une courbe que l'on appelle la courbe des intensités, et qui indique à l'œil toute la distribution des fluides magnétiques. La figure 23 (Pl. 15) représente la courbe trouvée par Coulomb, pour un fil d'acier dont *am* est la demi-longueur. Au milieu l'intensité est nulle, et de là elle va croissant jusqu'à l'extrémité. Pour les fils ou pour les lames de longueur différente, cette courbe est exactement la même, pourvu que la longueur surpasse 20 centimètres; elle ne fait alors que se transporter vers les extrémités, laissant vers le milieu un espace plus ou moins grand où l'intensité est sensiblement nulle. Il résulte de là cette propriété remarquable, qu'au-dessus de 20 centimètres de longueur, tous les aimants de même force ont leurs pôles à la même distance des extrémités; car, les pôles n'étant que les points d'application des résultantes totales, ces points sont placés de la même manière, dès que les intensités ou les composantes partielles suivent la même loi.

De plus, Coulomb a fait voir, par le calcul, que les pôles se trouvent à 40 millimètres des extrémités; et, en même temps, il a donné, pour les aimants très-courts, cette autre loi : que leurs pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, ou au sixième de la longueur totale, en partant des extrémités. Ce dernier résultat est une sorte de limite dont les pôles s'approchent de plus en plus à mesure que la longueur diminue. Ainsi, pour une aiguille de 8 à 9 centimètres, par exemple, les pôles seront à une distance un peu plus grande que 15 millimètres, c'est-à-dire 18 ou 20 millimètres.

Ces résultats supposent que les aimants ont des dimensions transversales très-petites par rapport à leur longueur, qu'ils sont d'une forme régulière dans toute leur étendue, et aussi qu'ils sont régulièrement aimantés. Quand ces conditions ne sont pas remplies, on ne peut plus connaître les pôles théoriquement; il faut alors les chercher directement avec la petite aiguille d'épreuve. Dans les losanges, les pôles se rapprochent du centre;

dans les aiguilles en flèche qu'on a coutume d'employer, il est difficile d'avoir une aimantation régulière et des pôles constants; dans les plaques larges ou épaisses par rapport à leur longueur, il y a généralement des pôles multiples ou des points conséquents; enfin, dans les anneaux d'acier très-homogènes, on peut obtenir des pôles ou diamétralement ou irrégulièrement opposés; mais l'aimantation régulière ne laisse apercevoir au dehors aucune trace de magnétisme; cette propriété est une conséquence de la théorie dont nous allons essayer de donner une idée.

198. Théorie du magnétisme. — Les anciens ne connaissaient de l'aimant que son attraction pour le fer, et c'est sur ce seul fait que pouvaient rouler leurs explications : or, dans tous les siècles, quand on a voulu à toute force expliquer un fait unique en son espèce, on n'a pu faire autre chose que d'exprimer le fait lui-même, par des mots vagues et métaphoriques, ou d'exprimer quelque liaison qu'on lui suppose avec un autre fait plus général. Thalès et Anaxagore disaient donc que l'aimant est doué d'une âme capable d'attirer et de mouvoir le fer; Cornélius Gemma (1535), qu'il y avait entre le fer et l'aimant des fils rayonnants invisibles; d'autres, qu'il y avait une sympathie; d'autres, une similitude; d'autres, une différence de parties : toutes explications qui n'expriment que le fait. Épicure supposait que les atomes de fer conviennent à ceux de l'aimant, et qu'ils s'accrochent; Plutarque imaginait qu'il y avait autour de l'aimant une émanation capable de faire le vide; d'autres aimaient mieux supposer des vapeurs; Cardan prétendait que le fer est attiré parce qu'il est froid; et Costeo de Lodi, médecin, regardait le fer comme la nourriture de l'aimant : en comparant ainsi les phénomènes magnétiques à quelque autre phénomène naturel, on pouvait multiplier les hypothèses, et l'on n'a pas manqué de les multiplier à l'infini. Gilbert fut assez hardi pour condamner toutes ces explications et autres pareilles; en même temps, il fut assez bon philosophe pour n'en proposer aucune à leur place. Descartes vint ensuite avec ses tourbillons et sa matière cannelée : comme il expliquait tout, il expliqua le magnétisme; son système fut adopté, et, pendant plus d'un siècle, il fut couronné dans les ouvrages de ses disciples. Descartes suppose qu'un tourbillon de matière subtile passe rapidement sur la terre, allant de l'équateur vers chacun des pôles; la matière ne l'arrête pas parce qu'elle est poreuse, mais les substances magné-

tiques, ayant des molécules rameuses fort mêlées et tissues ensemble, opposent au tourbillon une résistance plus grande que tous les autres corps ; voilà pourquoi elles sont dirigées. Cependant le tourbillon passe plus facilement dans un sens que dans l'autre, car il y a toujours une des extrémités qui se tourne de préférence vers le nord. Donc, ajoute Descartes, les pores du fer sont hérissés de poils qui cèdent et se courbent quand le tourbillon entre par un côté, mais qui se hérissent quand il veut entrer par le côté opposé. Au lieu de poils on peut concevoir des valvules ou un autre empêchement quelconque. Telles sont les idées fondamentales du système par lequel on a expliqué les phénomènes magnétiques jusqu'au temps d'Æpinus. Nous ne savons aujourd'hui ce qui doit le plus nous étonner, ou que la puissante intelligence de Descartes ait inventé de telles explications, et s'y soit arrêtée, ou que cent ans après ce philosophe, les hommes les plus éminents de leur siècle, comme Euler et Daniel Bernouilli, n'aient pu que reproduire ce système, en le fortifiant de leur autorité et de leur approbation.

Æpinus essaya enfin de soumettre au calcul tous les phénomènes magnétiques, et de montrer qu'ils peuvent se déduire des simples lois de l'attraction et de la répulsion ; c'était revenir à la vraie méthode expérimentale, et soulever cette espèce de voile dont l'esprit de système enveloppe la réalité des choses.

Æpinus n'avait admis qu'un seul fluide magnétique : après lui, et tout en conservant ses principes, on supposa qu'il y avait deux fluides différents ; que leur combinaison faisait l'état naturel, et leur séparation l'état magnétique : mais l'on supposait que ces fluides, une fois séparés, pouvaient traverser les corps et se répandre dans leur masse.

Enfin, Coulomb posa les vrais principes de la théorie que nous admettons aujourd'hui ; il conserva les deux fluides, mais il fit voir que ces fluides ne peuvent éprouver dans les corps qu'un déplacement insensible : c'est ce qui résulte en effet des expériences que nous avons rapportées. Ainsi, nous supposons, 1° que le *volume apparent* d'une substance magnétique se trouve composé d'une multitude de petits espaces, dans lesquels il y a du magnétisme, et d'une multitude d'autres petits espaces où le magnétisme n'existe pas ; 2° que les deux fluides contenus dans chaque petit espace magnétique peuvent être séparés quand la force qui les sollicite est capable de vaincre la force coercitive ;

qu'ils peuvent s'arranger suivant les lois voulues par l'équilibre, mais qu'ils ne peuvent jamais sortir de la petite étendue dans laquelle ils ont été primitivement enfermés ; tout ce qui les environne est imperméable.

Les petits espaces où il se trouve du magnétisme s'appellent les *éléments magnétiques* ; les petits espaces où il ne s'en trouve pas s'appellent les *éléments non magnétiques*. Nous ne savons pas si les éléments magnétiques sont les intervalles qui séparent les atomes de la matière pondérable, ou s'ils sont les atomes eux-mêmes, et nous ne savons pas non plus s'ils sont des intervalles d'une agrégation d'atomes ou d'une molécule secondaire, ou s'ils sont les agrégations ou les molécules elles-mêmes. La somme des éléments magnétiques et celle des éléments non magnétiques forment le volume apparent d'un corps ; le rapport de ces deux sommes peut changer avec la température et avec la nature des substances, et ses changements ont une grande influence sur la distribution et sur l'intensité du magnétisme.

Poisson a soumis au calcul ces hypothèses de Coulomb ; mais il ne nous est pas possible de donner ici une idée de sa savante analyse.

CHAPITRE IV.

Des Procédés d'aimantation, et des causes qui modifient la force coercitive.

199. Procédé de Duhamel ou de la touche séparée. — Ce procédé consiste à disposer bout à bout, sur une même ligne et à une certaine distance (Pl. 15, Fig. 28), deux puissants faisceaux, f et f', dont les pôles opposés se regardent (on n'a représenté que leurs extrémités, ils sont pareils à celui de la figure 22). Sur ces faisceaux, qui restent *fixes* pendant l'expérience, on place l'aiguille à aimanter de telle sorte qu'elle empiète au plus de 30 ou 40 millimètres sur chaque extrémité, ou seulement de 18 à 20 millimètres si elle n'a que 10 ou 12 centimètres de longueur. Alors, on prend les deux barreaux glissants, g et g', l'un dans la main droite, l'autre dans la main gauche; on les pose au milieu de l'aiguille, on les incline sur elle de 25 ou 30°, et, en les séparant, on les fait glisser sous cette inclinaison, d'un mouvement lent et uniforme, pour qu'ils arrivent en même temps à chacune de ses extrémités; là, on les *relève*, on les rapporte au milieu, et l'on répète la même opération jusqu'à ce que l'aiguille ait reçu le nombre de frictions nécessaires. Quand l'aiguille est trop mince ou trop fragile pour supporter le poids des barreaux glissants, on la soutient par une pièce de bois l, sur laquelle on peut même la fixer pour qu'elle n'éprouve aucun déplacement pendant l'opération. Il est évident que chacun des barreaux g et g' doit toucher l'aiguille par le même pôle que le barreau fixe vers lequel il marche. Ce procédé est le plus avantageux pour aimanter, de la manière la plus complète et la plus régulière, les aiguilles de boussole et les lames dont l'épaisseur ne dépasse pas 4 ou 5 millimètres.

200. Procédé d'Æpinus ou de la double touche. — Quand les lames ont une épaisseur plus grande que 4 ou 5 millimètres, la méthode dont nous venons de parler est insuffisante pour les aimanter à saturation, et il est nécessaire alors de recourir au procédé d'Æpinus, qui ne diffère du premier que par la disposition et le mouvement des barreaux glissants. Ces barreaux

sont encore l'un et l'autre posés au milieu de la lame, chacun la touchant par le pôle du même nom que celui de l'aimant fixe dont il est le plus voisin (Fig. 27); mais, cette fois, leur inclinaison sur elle est seulement de 15 ou 20°, et on les promène *ensemble*, du milieu vers l'une des extrémités, puis de cette extrémité vers l'autre, en parcourant toute la longueur de la lame; on répète ainsi les frictions ou le mouvement de *va-et-vient*, d'un bout de la lame à l'autre, avec la double condition de finir toujours au milieu, et d'y arriver en revenant de l'extrémité de droite si on a commencé les frictions en allant vers la gauche et réciproquement; c'est le seul moyen de passer le même nombre de fois sur chaque moitié. Pour rendre cette manœuvre plus commode, on peut fixer les aimants glissants dans une espèce de triangle en bois ou en cuivre; mais, dans tous les cas, il faut avoir soin de laisser entre leurs extrémités inférieures une distance de 5 ou 6 millimètres, qui se conserve toujours la même, au moyen d'une petite lame *l* de bois, de cuivre, ou de plomb.

Ce procédé fut imaginé par Æpinus, dont il conserve le nom, et on l'appelle aussi *procédé de la double touche*, parce que les barreaux glissants *touchent à la fois* la même moitié de la lame qu'on aimante, tandis que, dans le procédé de Duhamel, ils *touchent séparément* chacune de ses moitiés.

La *double touche* est préférable à la *touche séparée* lorsqu'il s'agit d'aimanter des barreaux épais, parce qu'elle y développe une plus grande quantité de magnétisme : mais elle ne doit jamais être employée lorsqu'il s'agit des aiguilles de boussole ou des lames destinées à des recherches de précision, parce qu'elle présente deux inconvénients qu'il faut alors soigneusement éviter : premièrement, elle donne *toujours* des pôles d'une force inégale; secondement, elle donne souvent des points conséquents, surtout quand les lames ont une grande longueur.

201. Du point de saturation. — La quantité de magnétisme que *prend* un corps va toujours croissant avec la force des barreaux qui servent à l'aimanter; mais la quantité de magnétisme qu'il *conserve* est susceptible d'une certaine *limite*, que l'on appelle le *point de saturation*. Par exemple, une aiguille qui fait seulement 100 oscillations en 100″ lorsqu'on l'aimante avec de faibles barreaux, peut faire ces 100 oscillations en 90″, en 80″, en 70″, etc., lorsqu'on l'aimante par l'une ou l'autre des mé-

thodes précédentes avec des barreaux fixes ou glissants d'une force graduellement croissante. Mais ensuite, abandonnée à elle-même après chacune de ces opérations, elle présente les phénomènes suivants : au-dessous d'une certaine intensité magnétique, de celle, par exemple, qui répond à 100 oscillations en 40", elle conserve tout le magnétisme qu'elle a reçu, c'est-à-dire qu'après des mois ou des années, elle mettra à faire 100 oscillations le même temps qu'elle mettait immédiatement après l'aimantation ; mais les intensités plus grandes, celles qui lui font faire 100 oscillations en 30", ou en 20", décroîtront plus ou moins rapidement avec le temps; l'aiguille retombera enfin au point de faire ses 100 oscillations en 40", et cette limite d'intensité sera son point de saturation. Il est évident, d'après cela, que le point de saturation d'une lame ou d'une aiguille ne dépend que de sa force coercitive, et nullement de la force des aimants qui ont servi à développer son magnétisme.

On prétend, en général, que les corps *sursaturés* de magnétisme retombent *immédiatement* au point de saturation : mais, dans le cours de mes recherches magnétiques, j'ai pu observer des corps très-variés dans leur nature, dans leurs dimensions et dans les degrés de leur force coercitive, et j'ai toujours éprouvé que le point de saturation n'est pas une limite aussi fixe qu'on le suppose : premièrement, il y a toujours, après l'aimantation, *une réaction des fluides*, qui change leur arrangement, et qui augmente quelquefois l'intensité magnétique; secondement, les aiguilles sursaturées perdent très-lentement l'excès de leurs fluides, et il n'est pas rare, après plusieurs mois, de les voir encore éprouver quelques légères variations. Il est inutile d'ajouter qu'il faut, dans ces observations, tenir compte des changements de température et des autres causes accidentelles qui pourraient avoir de l'influence sur les intensités magnétiques.

Pour reconnaître qu'une aiguille est aimantée à saturation, il n'y a d'autres moyens que de la *réaimanter dans le même sens* avec des barreaux plus puissants que ceux qui l'ont aimantée la première fois. Si elle prend alors une intensité beaucoup plus grande, ce dont on s'assure par l'une des méthodes que nous avons indiquées, il est certain qu'elle n'était pas saturée, et si elle ne prend qu'une faible augmentation d'intensité, qu'elle perd ensuite avec le temps, ce sera une preuve qu'elle sera portée au point de saturation.

Il ne faudrait pas croire que l'on pût augmenter indéfiniment l'intensité magnétique d'une aiguille, en lui donnant un grand nombre de frictions avec de faibles barreaux. Passé un certain terme, les nouvelles frictions n'ajoutent rien, et ce terme arrive quand la résistance de la force coercitive est égale à la puissance décomposante des barreaux.

Il ne faudrait pas croire non plus qu'une aiguille aimantée par de puissants barreaux, pût sans inconvénient, être réaimantée ensuite par des barreaux glissants, d'une moindre intensité, car ceux-ci, même quand ils agissent dans le même sens que les premiers, lui font perdre peu à peu de son magnétisme, et la ramènent enfin au degré d'intensité qu'ils auraient pu lui donner. Cet effet remarquable est une nouvelle preuve que les barreaux glissants ne magnétisent qu'en déterminant dans chaque molécule des décompositions et des recompositions successives des deux fluides.

202. De l'influence de la trempe sur la force coercitive. — Le plus sûr moyen de tremper l'acier à divers degrés comparables entre eux est de lui donner d'abord la *trempe la plus dure*, et ensuite de le *recuire* graduellement jusqu'à un point déterminé; en sorte que *les divers degrés de trempe* ne sont véritablement que les *divers degrés de recuit*.

Pour donner à un barreau d'acier la trempe la plus dure, on le chauffe jusqu'au rouge *cerise clair*, et on le jette rapidement dans une grande masse d'eau froide. Le prompt refroidissement fait la trempe. Ainsi, pour qu'il reçoive une trempe égale, et pour qu'il ne se *tourmente* pas, il importe que le froid l'enveloppe et le saisisse instantanément dans toutes ses parties. On peut tremper l'acier dans l'huile, dans le suif, dans le mercure, dans la glace, dans des dissolutions de différentes substances, ou même dans les mélanges réfrigérants. Ces divers modes de refroidissement paraissent avoir de l'influence sur les propriétés mécaniques des ressorts, des tranchants et des pointes; mais ils ne paraissent pas modifier sensiblement les propriétés magnétiques de l'acier.

Pour *recuire* l'acier trempé, on le chauffe uniformément sur un lit de charbon pulvérisé, ou simplement concassé en fragments plus ou moins gros, suivant le recuit que l'on veut obtenir. La grande difficulté est de mesurer alors les divers degrés de chaleur; mais l'acier jouit d'une propriété remarquable qui

permet d'évaluer avec assez d'approximation la température qu'il éprouve. Lorsqu'on le chauffe de la sorte, sa surface prend de vives couleurs qui se succèdent assez lentement, à mesure que sa chaleur augmente : d'abord, au brillant éclat du métal succède une nuance de jaune clair ou *jaune paille;* à une température un peu plus haute, cette nuance tourne à l'*orangé*, puis à l'*orangé foncé*, ensuite au *rouge violet*, puis au *bleu vif*, puis à une couleur verdâtre très-éclatante, que l'on appelle *couleur d'eau*. Ces nuances, parfaitement distinctes, correspondent à des températures qui ne sont pas évalués en degrés centigrades, mais qui sont telles qu'il existe plus de 200° de différence entre le jaune paille et la couleur d'eau. La première de ces nuances paraît répondre à peu près à 200° et la seconde à environ 450°. Ensuite on peut pousser le recuit jusqu'au *rouge sombre*, au *rouge*, au *rouge cerise*, au *rouge cerise clair*, qui fait disparaître toute espèce de trempe, quand, au sortir de cette température, l'acier se refroidit librement dans l'air.

Pour déterminer maintenant l'influence de la trempe, on prend une lame d'acier, on la trempe au rouge clair, on l'aimante à saturation, et l'on observe ensuite le temps qu'elle met à faire 100 oscillations; puis on la recuit successivement jusqu'au jaune paille, à l'orangé foncé, au bleu et à la couleur d'eau, etc., en la retirant après chaque degré de recuit, pour l'aimanter à saturation, et lui faire faire 100 oscillations dont on observe la durée. Il est évident que les diverses intensités magnétiques de cette lame seront entre elles en raison inverse des carrés des temps observés. C'est ainsi que l'on arrive à constater par l'expérience : 1° que les lames qui ont reçu la trempe la plus dure sont douées de la plus grande force coercitive, et prennent, par conséquent, la plus grande intensité magnétique lorsqu'on les aimante avec des barreaux assez puissants; 2° que les lames recuites au bleu des ressorts, ou même à la couleur d'eau, conservent assez de force coercitive pour prendre une grande intensité magnétique. Or, l'acier trempé dur étant cassant comme du verre, il y a toujours de l'avantage à recuire les aiguilles jusqu'au bleu, puisqu'on ne perd que peu de chose en intensité magnétique, et que l'on évite ainsi tous les accidents qui pourraient provenir d'une rupture ou de quelques changements de forme.

Il faut cependant remarquer que l'acier ne se comporte pas tou-

jours comme nous venons de le dire ; quelquefois il prend inévitablement des points conséquents lorsqu'il est trempé dur ; d'autres fois, il ne prend le maximum d'intensité magnétique qu'après avoir été recuit jusqu'au rouge sombre, ou même jusqu'au rouge.

203. Influence de la chaleur sur le magnétisme. — Nous avons déjà dit qu'un aimant artificiel ou naturel, chauffé jusqu'au rouge blanc, perd complétement son magnétisme, de telle sorte qu'il n'est plus, après le refroidissement, qu'un corps inerte, sans force directrice et sans force magnétique. Cette observation est fort ancienne ; elle avait été faite par Gilbert. Mais, en perdant ainsi leurs fluides libres, ces corps ne perdent pas la propriété de redevenir magnétiques lorsqu'on les aimante de nouveau par les procédés que nous avons fait connaître ; seulement, leur force coercitive est changée ; celle des aimants naturels est diminuée sans qu'on puisse la reproduire, et celle des aimants artificiels est détruite jusqu'à ce qu'elle ait été rétablie par une nouvelle trempe.

Cette recomposition du magnétisme, par l'influence de la chaleur, ne se fait pas subitement à la température rouge ; elle se fait graduellement à mesure que la température s'élève. Pour s'en assurer, on prend un barreau aimanté, dont on observe la force en comptant la durée d'un certain nombre d'oscillations ; puis on le porte successivement à divers degrés de chaleur, et, à chaque fois, on le laisse refroidir pour observer de nouveau son intensité magnétique. Toutes ces intensités forment une série décroissante, depuis le point de départ jusqu'à la plus haute température à laquelle on arrive.

M. Kupffer, qui a fait de nombreuses observations sur ce sujet, explique d'une manière satisfaisante tous les résultats qu'il a obtenus, en supposant que chaque degré d'élévation de température augmente de la même quantité la durée d'un même nombre d'oscillations. Par exemple, de 0 à 30° Réaumur, chaque degré de température augmente d'une demi-seconde la durée de 300 oscillations d'une aiguille qui fait, à 10°, 300 oscillations en 784",5. Mais les expériences ne comprennent pas encore jusqu'à présent une assez grande étendue de l'échelle thermométrique pour qu'on puisse appliquer cette loi avec une entière confiance.

M. Kupffer a aussi remarqué qu'il faut un temps très-long pour qu'une température donnée achève sur un barreau toute

la recomposition qu'elle est capable de produire. Par exemple, une aiguille qui a été plongée à plusieurs reprises dans l'eau bouillante, où elle restait 10′ à chaque fois, n'a perdu qu'à la sixième immersion tout le magnétisme qu'elle pouvait perdre : d'abord elle ne mettait que 578″ à faire 200 oscillations; après la première immersion, elle en mettait 637; 645,5, après la deuxième; après la troisième, 645; après la quatrième, 647; après la cinquième, 650,5; après la sixième, 652; et aussi 652 après la septième.

Voici un autre effet de la chaleur, auquel on n'a pas fait assez d'attention : à la température du rouge cerise, les aimants, l'acier et le fer, perdent non-seulement le magnétisme libre qu'ils peuvent posséder, mais, de plus, ils deviennent incapables d'en recevoir la moindre trace. Pendant tout le temps qu'ils sont soumis à cette température, ils paraissent comme du bois et de la pierre, tout à fait insensibles à l'action décomposante des plus forts barreaux. Ainsi, les aimants, l'acier et le fer ont une *limite magnétique*, et cette limite se trouve à peu près vers la température du rouge cerise.

Quelques analogies assez remarquables entre les distances des atomes des corps et leurs propriétés magnétiques m'avaient conduit à penser que la limite magnétique des différents corps devait se trouver à des températures très-différentes, et j'ai, en effet, démontré par l'expérience :

1° Que le cobalt ne cesse jamais d'être magnétique, ou plutôt que sa limite magnétique est à une température plus haute que le rouge blanc le plus éclatant;

2° Que le chrôme a sa limite magnétique un peu au-dessus de la température rouge sombre;

3° Que le nickel a sa limite magnétique vers 350°, à peu près à la température de la fusion du zinc;

4° Enfin, que le manganèse a sa limite magnétique à la température de 20 à 25° au-dessus de 0°.

Les expériences sur les cinq corps simples magnétiques, le manganèse, le nickel, le chrôme, le fer et le cobalt, semblent prouver :

1° Que la chaleur n'agit sur le magnétisme que par la distance plus ou moins grande qu'elle détermine entre les atomes des corps;

2° Que toutes les substances deviendraient magnétiques si l'on

pouvait, par une action quelconque, rapprocher leurs atomes à une distance convenable.

Voilà, à peu près, tout ce que nous connaissons jusqu'à présent des influences de la chaleur sur les fluides magnétiques; il faut espérer qu'un si beau et si vaste sujet de recherches ne sera pas longtemps négligé, et que bientôt on en pourra faire sortir quelque découverte fondamentale.

204. Des causes qui peuvent aimanter les substances magnétiques. — Nous venons de voir que la chaleur est une cause très-efficace pour déterminer la recomposition du magnétisme libre, mais elle est tout à fait impuissante pour déterminer la séparation des fluides; du moins, il a été impossible jusqu'à ce jour d'obtenir par la chaleur la moindre trace d'aimantation, même dans les corps où l'équilibre magnétique est le plus facile à rompre. Ainsi, le magnétisme et la chaleur sont des agents naturels qui paraissent n'avoir aucune prise directe l'un sur l'autre.

La lumière ne paraît pas plus efficace que la chaleur pour déterminer une séparation des fluides magnétiques. Il est vrai que quelques observateurs, et particulièrement M. Morichini, ont cru reconnaître un pouvoir magnétisant dans les rayons solaires; mais j'ai apporté beaucoup de soins à répéter ces expériences sans découvrir aucune action sensible. MM. Reiss et Mozer n'ont pas été plus heureux. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLII, p. 304.)

Il n'en est pas de même de l'électricité, elle agit sur le magnétisme avec une puissance remarquable. C'est la découverte de cette action qui a fait naître l'*électro-magnétisme*, branche nouvelle de la science, que nous devons étudier après l'électricité, et qui a reçu en peu d'années d'immenses développements.

205. Des aimants artificiels et naturels. — Nous avons déjà dit qu'on appelle en général aimants naturels les substances qui sont aimantées au sortir du sein de la terre, et aimants artificiels toutes les substances dans lesquelles nous parvenons, par nos procédés, à fixer du magnétisme. Un aimant naturel, chauffé au rouge, et réaimanté après cette opération, serait un véritable aimant artificiel. En donnant les procédés d'aimantation et les moyens de changer et augmenter la force coercitive, nous avons donc donné les méthodes d'après lesquelles les ai-

mants doivent être composés ; nous n'avons plus à présent qu'à faire connaître comment on peut les conserver, et comment on peut les assembler pour augmenter leur puissance.

Les aiguilles, les lames et les barreaux de toute espèce sont des aimants d'une seule pièce, qui, étant une fois aimantés à saturation, conservent très-bien leur magnétisme : cependant, les lames et les barreaux pouvant être disposés de différentes manières à l'égard de la force terrestre, cette force peut, dans des circonstances favorables, déterminer une recomposition partielle des fluides. Par exemple, dans nos climats, un barreau qui serait tenu verticalement son pôle boréal en bas, éprouverait une diminution magnétique, et si, dans cette position, il recevait quelques chocs ou quelques coups de marteau, il pourrait en peu de temps être réduit à une force très-faible, ou même prendre des pôles contraires. C'est pour empêcher ces recompositions que l'on emploie les *armatures*. On appelle en général *armures* ou *armatures* des pièces de fer doux qui sont mises en contact avec les aimants pour maintenir leur activité par la décomposition magnétique qu'elles éprouvent. Pour armer des barreaux, on les dispose parallèlement dans leurs boîtes, de manière que les pôles contraires se correspondent, et, aux deux extrémités, on ajoute transversalement deux prismes quadrangulaires de fer doux qui complètent le parallélogramme. Chacune de ces pièces de fer devient ainsi un aimant qui réagit sur les barreaux pour y fixer les fluides décomposés.

Les aiguilles qui sont en activité ne peuvent point recevoir d'armature, mais elles n'en ont pas besoin, puisqu'elles se tournent sans cesse pour obéir à la force qui les sollicite ; c'est cette force elle-même qui leur sert d'armature.

Les *faisceaux magnétiques* sont des assemblages de plusieurs lames dont les armatures exigent beaucoup plus de soin. La figure 22 (Pl. 15) représente un faisceau construit d'après les méthodes de Coulomb ; il se compose de 15 lames rectangulaires disposées en 3 couches de chacune 5 lames. Les lames de la couche supérieure et celles de la couche inférieure sont plus courtes de 7 ou 8 centimètres que celles de la couche moyenne ; ce qui donne à chaque extrémité un retrait de 3,5 à 4 centimètres. Toutes ces lames, qui sont du reste pareilles dans leurs dimensions, s'ajustent dans les pièces de fer *f*, qui servent d'armatures ; un lien de cuivre *cc'* les retient à chaque bout et les presse de ma-

nière que le système entier soit parfaitement immobile. Ces grands faisceaux sont destinés à être fixes lorsqu'on s'en sert pour aimanter; on construit, sur les mêmes principes, des faisceaux glissants qui ont une moindre longueur et qui ne se composent que de 6 ou 9 lames.

La figure 19 représente un aimant en *fer à cheval :* c'est un assemblage de plusieurs lames qui sont immédiatement superposées. Après les avoir trempées, on les recuit, et on les dresse de manière qu'elles puissent s'appliquer exactement l'une sur l'autre; deux vis v et v', de fer ou de cuivre, les retiennent dans cette position. Ces lames sont aimantées séparément avant d'être assemblées : pour cela, on les met en prise, aux deux bouts, avec les pôles contraires de deux puissants barreaux, et, en partant du milieu ou du sommet de la courbure, on fait, par la méthode de la double touche, autant de frictions qu'il est nécessaire. Un anneau nn' sert à suspendre l'aimant, et une pièce de fer doux pp' qu'on appelle le *portant* ou le *contact*, reste toujours en prise avec les deux pôles contraires a et b. Le *contact* n'a en général que le tiers de l'épaisseur de l'aimant, et il est légèrement arrondi sur sa surface de contact, de telle sorte qu'il ne touche l'aimant que par une seule ligne. Les aimants bien faits peuvent soutenir, au moyen du portant, jusqu'à 10 ou 20 fois leur poids.

Les armatures des aimants naturels sont représentées dans les figures 20 et 21 : les parties l, l' sont les *ailes* de l'armature; et les parties p, p' en sont les *pieds*. On donne aux ailes une largeur égale à celle de l'aimant, et une épaisseur d'environ 3 ou 4 millimètres; les dimensions des pieds dépendent de la force de l'aimant, et ce n'est que par des essais successifs que l'on peut arriver à la forme et à la grandeur le plus convenables.

On a observé sur les aimants naturels un phénomène dont il n'existe aucune explication plausible : c'est la *faiblesse* qu'ils éprouvent lorsqu'on *les surcharge*. Supposons qu'un aimant puisse porter 20 kilogrammes assez facilement : si on le charge de ces 20 kilogrammes, et que chaque jour on y ajoute un petit poids, on pourra graduellement augmenter la charge, au point de la porter à 30, ou peut-être à 40 kilogrammes. Mais, dès que le contact se détache, entraîné par l'excès du poids, il est impossible de le faire reprendre : l'aimant ne veut plus *mordre*, et il faut revenir à une charge moindre que les 20 kilogrammes

Digitized by Google

de point de départ, pour que l'aimant la puisse porter; cependant, avec des précautions et du temps, on parviendra à le *nourrir* de nouveau et à lui rendre sa première vigueur.

Lorsque, au lieu d'aimanter des aiguilles ou des prismes, on aimante des lames très-larges et peu épaisses, il est facile d'y varier la distribution magnétique d'une infinité de manières : en prenant, par exemple, des plaques de tôle d'acier de 3 ou 4 décimètres carrés et de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur, et en traçant sur leur surface avec un aimant assez fort des figures quelconques, on peut rendre ces figures apparentes en répandant de la fine limaille de fer avec un tamis sur la surface aimantée de la plaque. M. de Haldat a publié un mémoire intéressant sur ce sujet (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLII, p. 33).

La figure 29 représente un *système d'aiguilles compensées*, ce sont des aiguilles à coudre aimantées dont les pôles sont opposés; le système serait *astatique*, si les deux forces contraires étaient parfaitement égales; mais, quand elles sont inégales, il conserve une force directrice qui est augmentée ou diminuée suivant l'inclinaison que l'on donne à l'aiguille oblique supérieure. La figure 30 est le système compensé, tel qu'on l'emploie dans les multiplicateurs auxquels on veut donner beaucoup de sensibilité. (Voy. *Électro-magnétisme.*) Le degré de compensation s'apprécie par la durée des oscillations.

DEUXIÈME SECTION.

DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

Des Actions électriques.

206. Il y a des substances qui prennent, par le frottement, la propriété d'attirer les corps légers.—Il est facile de s'assurer que les diverses substances, prises dans leur état naturel, n'ont aucunement la propriété d'attirer les petits fragments de feuilles d'or ou de clinquant, ni la sciure de bois ou de moelle de sureau, ni les barbes de plumes, ni d'autres corps légers, quels qu'ils soient; mais lorsque, avec une étoffe de laine ou de soie, on frotte un tube de verre, un bâton de soufre ou de résine, un morceau d'ambre ou de succin, ces différents corps prennent à l'instant cette propriété remarquable: ils attirent à eux tous les corps légers qu'on leur présente, et cette attraction est si forte que les minces feuilles de métal, par exemple, sont enlevées à plus de 20 ou 30 centimètres de distance et viennent se précipiter sur la surface du corps attirant (Pl. 17, Fig. 3). La cause de ce phénomène est ce que l'on appelle l'*électricité*, du mot grec ἤλεκτρον, qui signifie *ambre*, parce que la propriété dont il s'agit fut autrefois découverte dans cette substance par les plus anciens philosophes grecs.

Pour distinguer avec plus de certitude les corps qui deviennent électriques par le frottement, on emploie divers appareils que l'on appelle en général *électroscopes*, c'est-à-dire, instruments propres à découvrir l'électricité.

Le plus simple des électroscopes est le *pendule électrique*, qui se compose d'une petite balle de sureau suspendue à l'extrémité d'un fil de soie ou d'un fil de métal très-fin (Fig. 1). Lorsqu'on veut éprouver un corps, on l'approche de la balle, et s'il ne peut pas l'attirer à lui d'une quantité sensible, on est

assuré qu'il n'a point d'électricité, ou plutôt qu'il n'en peut avoir qu'une très-faible charge.

L'*aiguille électrique* (Fig. 2) est un autre électroscope un peu plus *sensible* que le pendule : elle se compose d'un fil de cuivre, terminé par deux boules métalliques *b* et *b'*, qui doivent être creuses pour être plus légères; au milieu de la longueur du fil est une chape en acier ou en agate, que l'on pose sur un pivot. Une très-faible action électrique suffit pour mettre l'aiguille en mouvement.

L'*électroscope de Coulomb* (Fig. 4) est l'appareil le plus sensible et le plus délicat pour indiquer la présence des forces électriques. On le construit avec un fil de cocon *f*, une aiguille de gomme laque *gg'*, et un petit cercle de clinquant *e*. Le fil est fixé au treuil *t*, qui sert à l'enrouler ou à le dérouler pour élever ou abaisser l'aiguille. Une cage de verre *vv'* préserve l'aiguille des agitations de l'air, elle porte une circonférence divisée *dd'*, et un couvercle *cc'* percé d'une ouverture *o* : c'est par cette ouverture que l'on fait descendre lentement les corps électrisés qui doivent attirer l'extrémité de l'aiguille pour la faire tourner, à moins toutefois qu'ils ne soient assez puissants pour agir du dehors à travers l'épaisseur du verre.

Au moyen de ces appareils, on peut facilement soumettre à l'épreuve tous les corps, et voir s'ils sont tous capables de prendre de l'électricité par le frottement. L'expérience en est curieuse, par l'extrême variété des résultats qu'elle donne : on trouve en effet que la gomme laque et la résine, l'ambre, le soufre et le verre sont des corps éminemment électriques; qu'il en est de même du diamant, de la topaze, de l'émeraude et de la plupart des pierres précieuses; que la terre cuite, le bois et le charbon donnent rarement des signes d'attraction, même quand ils ont été frottés longtemps et à plusieurs reprises; enfin, que les métaux, et d'autres corps encore, ne prennent jamais la moindre apparence attractive, quelque soin que l'on apporte à répéter ou à varier les frictions. Voilà donc tous les corps de la nature séparés en deux grandes classes : ceux qui prennent de l'électricité par le frottement, que l'on appelle *idio-électriques*; et ceux qui n'en prennent pas, que l'on appelle *anélectriques*.

207. Des corps conducteurs et des corps non conducteurs. — Si les corps anélectriques ne prennent pas d'électricité quand on les frotte, ils peuvent cependant en prendre d'une autre ma-

nière. C'est Gray, physicien anglais, qui fit cette découverte en 1727. Gray, après avoir électrisé un tube de verre ouvert par les deux bouts, voulut voir s'il obtiendrait les mêmes résultats en fermant le tube avec un bouchon de liége; car, à cette époque, la science était encore si peu avancée, que l'on essayait de tout au hasard; on n'avait rien pour se conduire, pas même un système. Or, en faisant l'expérience, Gray s'aperçut avec un grand étonnement que le bouchon lui-même était devenu électrique, tandis qu'il ne l'est jamais lorsqu'on le frotte directement. Une tige de métal, plantée dans le bouchon devint électrique comme lui; une tige plus longue le devint pareillement, et l'habile observateur ne se lassait pas de répéter des expériences aussi curieuses. Voyant qu'il ne pouvait pas, dans son cabinet, ajuster au bouchon des tiges assez longues, il imagine de monter au premier étage, et de suspendre à son tube électrique un fil de métal qui descende jusqu'au sol; il frotte le tube, et un de ses amis présente des corps légers à l'extrémité du fil: chose surprenante! les corps légers y sont vivement attirés. On répète l'expérience au second et au troisième étage, et toujours avec le même succès. Donc, le métal a la propriété de transmettre l'électricité; et, puisqu'il la transmet instantanément, il faut que l'électricité soit une espèce de *fluide* qui passe du verre au métal et qui se répande instantanément sur toute sa surface. Cette propriété se manifeste dans tous les corps anélectriques, et on l'exprime en disant que tous ces corps sont *conducteurs* de l'électricité. Au contraire, les corps idio-électriques sont *non conducteurs*, c'est-à-dire que l'électricité ne se répand jamais sur leurs surfaces; car, en frottant un tube de verre à l'une de ses extrémités seulement, son autre extrémité ne donne aucun signe d'attraction.

Cette vérité fondamentale peut être démontrée avec la *machine électrique*, que nous prendrons seulement comme moyen d'avoir de l'électricité : on fait communiquer avec elle un long fil de métal, soutenu par des fils de *soie* ou par des tubes de *verre*, et, dès qu'on tourne la machine, on reconnaît aisément: 1° qu'il est électrisé dans toute son étendue, quelle que soit sa longueur, et quelles que soient les circonvolutions qu'on lui fasse parcourir; 2° que, s'il est interrompu quelque part, par du verre ou de la soie, il ne montre plus d'électricité au delà de cette interruption; 3° et que, s'il touche *au sol*, il ne donne plus

aucun signe électrique, car le sol est assez bon conducteur pour que l'électricité s'y répande, se dissipe au large sur toute sa surface, et de là se communique à l'édifice entier, ou même au globe de la terre.

Il résulte de là que l'air est un corps non conducteur; car, s'il était conducteur, comme le métal, l'électricité développée par le frottement passerait du corps frotté dans l'air qui l'environne, et se disperserait à l'instant dans toute la masse de l'atmosphère.

L'eau et la vapeur d'eau sont de bons conducteurs : un corps électrisé donne toute son électricité à l'eau dans laquelle on le plonge, ou à la vapeur d'eau bouillante à laquelle on l'expose. C'est pourquoi l'électricité, qui se conserve longtemps dans l'air sec, se dissipe promptement dans l'atmosphère quand l'air est humide.

Le corps humain est aussi un bon conducteur : quand un homme est debout sur un mauvais conducteur, comme un gâteau de résine, il s'électrise dans toute son étendue, en touchant avec la main les conducteurs de la machine; et, quand il touche au sol, il ne conserve rien de l'électricité qu'il prend à ces conducteurs; il la transmet au sol où elle va se perdre. Cette propriété nous explique pourquoi les métaux ne s'électrisent point lorsqu'on les tient à la main nue, puisque leur électricité doit se dissiper à mesure qu'elle se développe.

Les plus mauvais conducteurs deviennent d'assez bons conducteurs lorsqu'on les humecte de quelque vapeur aqueuse : c'est pourquoi il faut chauffer les corps pour les sécher avant de les soumettre au frottement; alors le moindre contact les électrise, et même la main sèche jouit de cette propriété; en passant, par exemple, un tube de verre, un ruban de soie ou une bande de papier entre les doigts, on leur donne une grande force électrique.

La *conductibilité électrique* des différents corps dépend donc d'une cause permanente, qui est la nature de leur substance; mais elle dépend aussi de plusieurs causes accidentelles dont il est difficile de mesurer l'influence. Ainsi, au lieu de dire que les corps sont conducteurs ou non conducteurs, il est plus exact de dire qu'ils sont bons conducteurs ou mauvais conducteurs; car il n'existe pas un corps qui soit non conducteur absolu. Les plus mauvais conducteurs sont la gomme laque, la soie, le verre et les résines; on les appelle aussi corps *isolants*, parce que les corps électrisés qui reposent sur eux sont véritablement isolés ou

séparés du sol, et conservent longtemps l'électricité qu'ils possèdent. Les métaux sont les meilleurs conducteurs que l'on connaisse : nous verrons qu'un fil de métal, de plusieurs lieues de longueur, s'électrise à l'instant dans toute son étendue, lorsqu'un peu d'électricité est développée ou déposée sur un seul de ses points. Entre les plus mauvais et les meilleurs conducteurs se trouve l'infinie variété des corps de la nature ayant tous des degrés de conductibilité différents.

208. Des deux espèces d'électricité. — Un corps électrisé repousse un corps léger auquel il vient de lui communiquer de son électricité. En effet, prenons un *pendule isolé* (c'est le pendule de la figure 1, dont le support est de verre et dont le fil de suspension est de soie) : dès que nous approchons un tube électrisé, la balle de sureau est fortement *attirée;* mais vient-elle toucher le tube et se coller à lui pendant quelques instants, aussitôt elle est *repoussée*, et repoussée à distance comme elle était attirée d'abord. Cette répulsion de la balle est produite par l'électricité qu'elle a prise au tube; car, en la touchant avec la main pour la remettre à l'état naturel, elle est *attirée* de nouveau, et de nouveau *repoussée* dès qu'elle est venue au contact; et ce qui en est une preuve encore plus frappante, c'est qu'alors elle attire les corps naturels, ou plutôt elle est attirée par eux, parce qu'elle est plus mobile. Cette expérience peut être faite avec l'électroscope de Coulomb, ou avec l'aiguille électrique *en l'isolant*, ou avec une feuille d'or qui flotte dans l'air. Dans tous les cas, chaque corps électrique, quel qu'il soit, repousse toujours le corps léger qu'il vient de toucher.

Mais si l'on prend deux pendules isolés (Fig. 6), l'un qui soit électrisé par le verre et repoussé par lui, l'autre électrisé par la résine et pareillement repoussé par elle, on observe ce phénomène remarquable : que le verre attire puissamment le pendule qui a été électrisé par la résine, et *vice versâ*, que la résine attire aussi très-vivement le pendule qui a été électrisé par le verre; on peut même constater que les pendules s'attirent l'un l'autre, tandis que deux pendules touchés avec le même corps électrique se repoussent mutuellement (Fig. 5). Donc, l'électricité du verre et celle de la résine ne sont pas identiques, puisque chacun attire ce qui est repoussé par l'autre.

Ces deux électricités, différentes dans leur origine et dans leurs effets, doivent porter aussi des noms différents : la pre-

mière est appelée *électricité vitrée*, et la seconde *électricité résineuse*.

Ainsi, nous sommes conduits à cette conséquence importante : qu'il y a deux électricités telles que chacune se repousse et attire l'autre.

Sans avoir éprouvé les autres corps, nous pouvons être assurés d'avance que leur électricité est résineuse ou vitrée, car s'ils agissent sur un pendule électrisé, il faut bien qu'ils le repoussent ou qu'ils l'attirent : c'est, au reste, ce qu'il est facile de vérifier sur tous les corps. Cette belle découverte des deux électricités a été faite par Dufay, physicien français, en 1733 (*Mém. de l'Académie des sciences*, 1733).

Quelques physiciens donnent à l'électricité vitrée le nom d'*électricité positive*, et à l'électricité résineuse celui d'*électricité négative*. Il nous arrivera souvent d'employer ces dénominations, bien qu'elles tiennent à un système où l'on essaye d'expliquer tous les phénomènes par une seule électricité, qui serait tantôt *en excès* ou *en plus*, tantôt *en défaut* ou *en moins*.

209. Des fluides électriques et de l'état naturel des corps. — De la rapidité avec laquelle l'électricité se répand sur toute l'étendue des corps conducteurs, on conclut qu'elle est un fluide excessivement mobile; et de l'opposition qui existe entre les électricités du verre et de la résine, on conclut que ce fluide est double, c'est-à-dire qu'il y a deux fluides électriques, comme il y a deux fluides magnétiques. Ces deux fluides, *combinés* entre eux par leur attraction mutuelle, ou *neutralisés* l'un par l'autre, constituent l'*état naturel* des corps; mais viennent-ils à être *décomposés* ou *séparés* par une cause quelconque, les actions contraires qu'ils exercent au dehors ne peuvent plus se compenser exactement, et le corps dans lequel cette *décomposition* a eu lieu est un corps électrisé : il est *électrisé vitreusement* si c'est le fluide vitré qui domine, et *résineusement* si c'est le fluide résineux. Quant au mode d'existence du fluide électrique dans l'intérieur des corps, tous les phénomènes semblent indiquer qu'il est répandu dans les intervalles qui séparent les atomes pondérables, et que là il peut être, de proche en proche, décomposé et recomposé, suivant les forces qui le sollicitent. Il y a toutefois une différence fondamentale entre le fluide électrique et le fluide magnétique : celui-ci est enfermé dans les éléments magnétiques, il peut s'y mouvoir, mais il n'en peut sortir; tandis

que le fluide électrique est libre dans tous les corps, il peut traverser dans tous les sens toute l'étendue de leur masse, et même il peut en sortir pour se répandre et s'accumuler sur les corps voisins. Cette vérité résulte évidemment de toutes les expériences que nous avons déjà rapportées, et nous la verrons confirmée par l'ensemble des phénomènes électriques.

Lorsque nous développons de l'électricité résineuse ou vitrée dans un corps qui était d'abord à l'état naturel, il faut donc que l'électricité contraire se trouve pareillement développée, ou bien qu'elle soit détruite par la cause décomposante. Or, la destruction d'un agent naturel ou d'une force n'étant pas moins impossible que la destruction de la matière elle-même, nous pouvons être assurés que jamais l'une de ces électricités n'est développée sans l'autre. C'est au reste ce que l'on peut vérifier par l'expérience, en frottant l'un contre l'autre deux disques isolés par des manches de verre (Fig. 7) : lorsque après le frottement on les tient unis, ils ne donnent aucun signe d'électricité ; mais dès qu'on les sépare, il est facile de reconnaître que l'un possède l'électricité vitrée, et l'autre la résineuse. Ces disques peuvent être de verre, de résine, de bois ou de métal ; et si l'on veut donner plus de variété à l'expérience, on y colle des fourrures, des étoffes, du papier, etc., car l'espèce d'électricité ne dépend que des surfaces frottantes.

Un corps naturel possédant les deux électricités en égale proportion, il semble d'abord qu'il n'y ait pas de raison pour qu'il prenne ou qu'il conserve l'un des fluides de préférence à l'autre ; aussi est-il susceptible de devenir, par le frottement, tantôt résineux et tantôt vitré : par exemple, le verre est vitré quand on le frotte avec la laine ou la soie, et il est résineux quand on le frotte avec une peau de chat, une peau de loutre, et plusieurs autres fourrures. Il y a pareillement des corps qui font prendre à la résine l'électricité vitrée, tandis que beaucoup d'autres lui font prendre la résineuse. Pour définir rigoureusement chacun des fluides, il convient donc d'ajouter que le fluide *vitré* est produit par le *verre frotté avec la laine*, et le *résineux* produit par la *résine frottée avec la peau de chat*, *la laine* ou *la soie*.

Concevons que l'on dresse une liste de tous les corps, en les rangeant par ordre de *tendance électrique*, de telle sorte que chacun soit vitré avec les suivants, et résineux avec les précédents ; alors on pourra reconnaître que des circonstances presque

imperceptibles feront changer la place d'un corps dans cette liste : par exemple, une élévation de température le prédisposera à prendre l'électricité résineuse et le fera redescendre de plusieurs rangs, tandis que le refroidissement le fera remonter, en le rendant plus vitré; une surface plus polie le fera pareillement remonter, tandis qu'une surface plus rugueuse le fera redescendre. C'est ce qu'il est facile de vérifier sur un tube de verre dépoli. La couleur, la disposition des molécules ou des fibres, le sens de la friction, et même la pression plus ou moins forte du corps frottant, pourront produire des résultats analogues : par exemple, un ruban de soie noir prend toujours l'électricité résineuse quand on le frotte avec un ruban blanc, et des rubans de la même pièce, étant frottés en croix, celui qui est immobile prend l'électricité vitrée, et l'autre, la résineuse. Il y a même des substances, comme le *disthène*, qui, sur certaines parties de leur surface, prennent l'électricité vitrée, et la la résineuse sur d'autres, sans qu'on puisse y reconnaître la moindre différence de température ou d'aspect. On peut varier indéfiniment ces expériences, avec des rubans de laine ou de soie, des bandes de papier, des pièces de fourrure et des corps conducteurs que l'on isole très-bien en les supportant par des tuyaux de plume.

210. De la communication de l'électricité. — L'électricité se communique au contact et à distance, mais toujours son mode de communication dépend de la conductibilité des corps et de l'étendue de leur surface.

Au contact, les corps très-mauvais conducteurs ne prennent ou ne perdent de l'électricité que dans l'étendue des surfaces touchées; les très-bons conducteurs la prennent ou la perdent dans toute l'étendue de leur surface; et les corps intermédiaires, pour leur conductibilité, présentent des résultats intermédiaires, et prennent ou perdent l'électricité autour des points de contact, dans une étendue d'autant plus grande qu'ils sont meilleurs conducteurs.

L'électricité qui se communique *à distance*, se répand aussi sur les corps à raison de leur conductibilité, mais à son passage elle présente le phénomène curieux de l'*étincelle électrique*. Il n'est pas nécessaire qu'un tube soit très-fortement électrisé pour qu'on voie, à la distance de plus d'un centimètre, briller une vive étincelle, quand on en approche une tige de métal ou

même la jointure du doigt ; en même temps on entend un bruit sec, qui semble jaillir avec l'étincelle : nous verrons plus tard la cause du bruit et celle de la lumière. Quand le corps électrisé est métallique, et qu'il offre une grande surface, comme les conducteurs de la machine, l'étincelle part à 20, 30, 40 ou même 50 centimètres de distance ; sa lumière prend un éclat éblouissant, et le bruit qui l'accompagne frappe l'air comme un coup de fouet.

C'est Otto de Guericke, l'inventeur de la machine pneumatique, qui vit le premier l'étincelle électrique ; et plus tard, Dufay, dont nous venons de parler, excita une grande admiration en démontrant que du corps d'un homme on peut faire jaillir des étincelles et des lames de feu, comme des conducteurs de la machine.

Pour en faire l'expérience, il faut monter sur un gâteau de résine bien sec, ou sur un *isoloir* ayant des pieds de verre, et communiquer avec la machine, soit en la touchant avec la main, soit en la touchant avec une tige ou une chaîne de métal : la personne qui se trouve dans cette position ne reçoit aucun choc lorsqu'on tourne la machine pour développer de l'électricité ; seulement elle éprouve sur la peau, et surtout à la figure, l'impression d'un souffle léger ; ses cheveux se hérissent et laissent échapper des aigrettes de lumière. Alors, si on approche d'elle la jointure du doigt, ou quelque corps conducteur, on en tire de longues étincelles, et l'on éprouve soi-même une *commotion électrique* qui n'a rien de dangereux. Si l'étincelle ne part qu'à la distance de quelques centimètres, on ne sent qu'une légère piqûre ; si elle part à 10 ou 15 centimètres, la sensation se fait sentir jusqu'au coude, et tout l'avant-bras se fléchit d'un mouvement involontaire et irrésistible ; l'étincelle qui part à une distance plus grande, se fait sentir jusqu'à la poitrine, et produit un ébranlement dans tout le corps. Alors on est averti qu'il n'est pas prudent de recevoir des étincelles plus fortes. Pendant ce temps-là, la personne isolée qui communique à la machine ressent à peu près les mêmes secousses que la personne qui l'approche pour en tirer des étincelles.

Soit que le partage de l'électricité se fasse au contact ou à distance, entre des corps bons conducteurs, il se fait toujours en raison des surfaces. Ainsi, pour qu'un corps électrisé donne toute son électricité, il faut le mettre en communication avec une très-

grande surface, par exemple avec les murs ou le plancher de l'appartement, car les murs communiquent eux-mêmes avec le *sol* ou la *surface de la terre*, que l'on appelle le *réservoir commun*. En effet, une boule de cuivre, isolée à l'extrémité d'un manche de verre, ne tire des conducteurs de la machine que de très-faibles étincelles; tandis qu'elle tire les plus fortes étincelles, et décharge complétement les conducteurs, lorsqu'elle communique au sol par une chaîne conductrice (Fig. 32).

De ce qu'on n'est pas brûlé par la lumière électrique, il n'en résulte pas que ce soit une lumière sans chaleur : en effet, nous verrons par les expériences suivantes que, dans beaucoup de cas, l'électricité agit comme le feu, et qu'elle devient souvent un agent chimique des plus puissants.

Une bougie qui vient d'être éteinte se rallume à l'instant lorsqu'on tire une étincelle à travers la mèche encore chaude.

L'étincelle peut enflammer l'éther et même l'alcool; ces liquides sont dans un petit vase de métal, que l'on approche d'un corps électrisé, de manière que l'étincelle parte à la surface du liquide : le corps électrisé peut être une personne isolée communiquant avec la machine.

Le pistolet de Volta est représenté (Fig. 8) : c'est un petit vase de métal qui se ferme par un bouchon de liége; un fil de cuivre, terminé par deux petites boules *b*, *b'*, passe du dedans au dehors sans toucher les parois, et, pour cela, on le mastique avec de la cire dans un tube de verre *tt'*; l'étincelle qui entre par ce fil doit passer de la boule *b'* à la paroi opposée, en traversant le gaz qui remplit le pistolet. Si ce gaz est détonant, s'il est, par exemple, un mélange d'hydrogène et d'air, ou mieux encore d'hydrogène et d'oxygène, dans les proportions qui font l'eau, l'étincelle détermine l'action chimique, la détonation a lieu, le bouchon est lancé au loin, et de l'eau est formée.

Les *eudiomètres* à eau ou à mercure, dont on se sert avec tant d'avantage pour l'analyse des gaz, sont disposés pour recevoir l'étincelle électrique, à peu près comme le pistolet de Volta. Suivant la nature des gaz que ces appareils contiennent, il faut une étincelle plus ou moins forte pour déterminer la combinaison : il importe donc de faire franchir à l'électricité un espace assez grand; les petites boules doivent être distantes au moins de 5 ou 6 millimètres. L'étincelle se donne avec l'électrophore (215).

CHAPITRE II.

De l'Électricité par influence.

211. Un corps électrisé décompose à distance les électricités naturelles de tous les corps conducteurs. — Nous venons de voir que chacun des fluides électriques attire le fluide de nom contraire, et repousse celui de même nom ; ces attractions et répulsions n'ont pas lieu seulement sur les fluides libres et déjà décomposés, mais elles s'exercent aussi sur les fluides combinés ; et il résulte de là qu'un corps conducteur peut, *sans rien perdre et sans rien recevoir*, être constitué dans un état électrique particulier qui naît de la cause agissante à laquelle il est soumis, et qui cesse avec elle. C'est cette électricité produite à distance que l'on appelle *électricité par influence*.

Par exemple, un anneau de cuivre *nn'* (Pl. 17, Fig. 9), portant deux fils de métal très-fins et deux balles de sureau, est soutenu sur un tube ou sur un crochet de verre ; on le présente à un corps *r*, électrisé résineusement, et, à la distance de 20 ou 30 centimètres, on voit les deux balles qui s'écartent l'une de l'autre pour prendre la position *bb'* ; à une distance plus petite, la divergence est plus grande, sans que l'étincelle jaillisse entre l'anneau et le corps électrisé. Les balles *b*, *b'* sont donc chargées d'une même électricité, et même il est facile de reconnaître que cette électricité est résineuse, comme celle du corps *r* qui agit sur l'anneau et sur elles. Cependant, il n'en faudrait pas conclure qu'il y a une communication électrique au travers de l'air : car, en éloignant l'anneau, soit lentement, soit rapidement, la divergence diminue à mesure que la distance augmente, et elle devient tout à fait nulle quand la distance est assez grande ; ce qui n'arriverait pas si les balles ou l'anneau avaient reçu du corps *r* une électricité quelconque. Tout le phénomène se passe donc dans les balles de l'anneau, et dans les fils de métal qui les joignent. Ce système de corps conducteurs a ses fluides naturels décomposés par l'influence du corps électrisé ; tout le fluide vi-

tré qui résulte de cette décomposition se rassemble dans l'anneau où il est appelé par l'attraction de r, et tout le fluide résineux est refoulé dans les balles par la répulsion. Ainsi ces deux fluides sont simplement *déplacés*, dans le système conducteur ; ils se rejoignent par leur attraction mutuelle, et se recomposent dès que la distance du corps électrique est trop grande pour les maintenir séparés.

Pour ne laisser aucun doute sur cette vérité fondamentale, il suffit de venir toucher l'anneau avec un petit *plan d'épreuve*. (On appelle ainsi un petit disque de clinquant, collé à une longue aiguille de verre ou de gomme laque.) Le plan d'épreuve prend l'électricité du point qu'il touche, et si, après le contact, on le présente à un électroscope, électrisé d'avance, il est facile de reconnaître la nature de l'électricité dont il s'est chargé. On dit quelquefois qu'un corps est *dans la sphère d'activité* ou *hors de la sphère d'activité* d'un corps électrisé, suivant qu'il en ressent ou n'en ressent pas l'influence : mais il faut remarquer que ces expressions, dont on peut se servir sans inconvénient, sont bien moins relatives au corps électrisé lui-même qu'au corps que l'on soumet à son influence : rigoureusement, la sphère d'activité d'un corps électrisé s'étend à l'infini, et la distance à laquelle nous pouvons rendre ses effets sensibles dépend de la mobilité des appareils que nous employons.

On peut encore disposer l'expérience de la manière suivante : cc' (Fig. 10) est un *excitateur* (on nomme ainsi une tige de cuivre terminée comme le représente la figure) ; on suspend à chacune de ses extrémités un double pendule à fil de lin ou de métal, et on le place sur un isoloir s ; alors on approche un corps électrisé r, et l'on observe une divergence dans les balles. Si le corps est électrisé résineusement, comme le représente la figure, l'électricité vitrée se porte et s'accumule dans la partie de l'excitateur qui en est la plus voisine, et la résineuse est refoulée à l'extrémité opposée ; c'est ce qu'on peut vérifier en approchant un tube de verre électrisé ou un bâton de résine, ou en prenant de l'électricité avec le plan d'épreuve pour en reconnaître la nature. Le contraire arriverait si le corps r était électrisé vitreusement.

Un corps électrisé par influence agit, à son tour, pour électriser les corps voisins qui se trouvent dans sa sphère d'activité, et ces actions successives peuvent se propager jusqu'à de grandes distances. Il suffit de jeter les yeux sur la figure 12 pour voir

la disposition que l'on peut donner aux appareils dans ces expériences.

m est un conducteur de la machine,

c un premier cylindre isolé,

c' un second cylindre pareil,

b une boule de cuivre,

et *b'* une petite balle de sureau.

La divergence des balles indique la présence de l'électricité, et les signes + et — marquent son espèce.

Lorsqu'un corps conducteur est déjà chargé d'électricité, il n'en éprouve pas moins l'influence d'un autre corps électrisé, une seule expérience suffit pour montrer combien de phénomènes curieux peuvent résulter de ce principe. Le petit anneau à pendule, de la première des expériences qui précèdent, est électrisé résineusement : on lui présente un corps électrisé résineusement comme lui, et la divergence des balles augmente; donc son électricité résineuse est repoussée et refoulée dans les balles par l'électricité résineuse qui agit sur lui par influence, ou, si l'on veut, ses électricités naturelles sont séparées : la résineuse est refoulée dans les balles, où elle s'ajoute à la résineuse qui s'y trouve déjà; tandis que la vitrée est appelée dans l'anneau, où elle neutralise une égale portion de résineuse en se recomposant avec elle. La charge primitive de l'anneau et celle du corps qu'on lui présente peuvent être telles que, pendant l'action par influence, l'anneau se trouve encore électrisé résineusement, ou qu'il reprenne son état naturel, ou même qu'il se montre avec une charge d'électricité vitrée. C'est ce que l'on peut vérifier avec le plan d'épreuve.

Ces phénomènes sont plus apparents lorsqu'on donne à l'anneau une charge primitive d'électricité vitrée : alors, sous l'influence des corps résineux, qu'on approche graduellement, les balles se rapprochent peu à peu, reviennent au contact, et divergent de nouveau; ce qui prouve d'une manière évidente que leur électricité vitrée a été peu à peu appelée dans l'anneau, qu'elle y est venue en totalité, et qu'enfin, pour une moindre distance du corps agissant, il s'est fait une décomposition nouvelle qui refoule du fluide résineux dans les balles et qui leur donne une nouvelle divergence.

212. Les corps électrisés par influence retombent à leur état primitif dès que l'influence cesse. — Puisque la décom-

position par influence est instantanée dans les corps conducteurs, la recomposition doit être instantanée dès qu'on détruit la cause décomposante.

Or, on peut en général la détruire de deux manières : soit graduellement, en tirant du corps électrisé de petites étincelles avec un corps isolé, ou en augmentant la distance du corps conducteur qui reçoit son influence; soit subitement, en tirant du corps électrisé une étincelle totale qui le décharge complétement lorsqu'il est lui-même conducteur.

Dans le premier cas, la recomposition est graduelle comme la diminution de la force, et l'on s'en aperçoit à la divergence des balles, qui diminue de plus en plus. Dans le second cas, les deux électricités, séparées par influence, se rejoignent par leur attraction mutuelle, et se recomposent en totalité, comme on le voit par le rapprochement des balles, qui est subit et complet.

Dans ces phénomènes, ni l'un ni l'autre des fluides ne sort de la masse qui reçoit l'influence électrique, mais ils éprouvent tous deux un mouvement de translation dans l'étendue de cette masse, soit quand ils se séparent, soit quand ils se rejoignent; et ces mouvements rapides de l'électricité produisent dans les molécules pondérables des secousses mécaniques ou des effets chimiques très-remarquables.

Par exemple, une grenouille, préparée et disposée comme on le voit (Pl. 17, Fig. 11), semble n'éprouver aucun effet lorsqu'on tourne lentement la machine qui charge d'électricité vitrée le conducteur *c* : cependant, son électricité naturelle est décomposée par influence, la résineuse est appelée en *r*, tandis que la vitrée est repoussée dans le sol par le fil *s*, et, dès qu'on tire une étincelle au conducteur, la recomposition subite des électricités de la grenouille imprime à tout son corps une sorte de convulsion qui la fait sauter comme si elle s'élançait par un mouvement volontaire; preuve frappante que, dans le retour à l'état naturel, les molécules des corps sont agitées par les fluides qui se pressent pour se rejoindre. Les commotions de cette espèce s'appellent le *choc en retour*. L'expérience serait tentée sans succès sur une grenouille tuée depuis cinq ou six heures : mais elle réussit très-bien avec une grenouille qui vient d'être coupée et dépouillée, et mieux encore avec une grenouille vivante telle qu'elle sort de l'eau.

En présence d'une puissante machine, un homme qui com-

munique au sol éprouve des secousses analogues ; on en peut faire l'expérience avec un conducteur d'une grande superficie : deux personnes placées aux deux extrémités de ce conducteur n'éprouvent pas d'effets sensibles pendant qu'il se charge ; mais l'une d'elles s'approchant assez près pour tirer des étincelles, l'autre éprouve à l'instant toute la violence du choc en retour, sans qu'il paraisse aucune trace d'électricité ni de lumière entre elle et le conducteur.

En étudiant les effets de la foudre, nous verrons qu'un nuage orageux peut agir d'une manière analogue, et foudroyer à la fois par le *choc direct* et par le *choc en retour*.

Quand le corps conducteur qui reçoit l'influence électrique n'est pas en communication directe avec le sol, il se peut faire qu'il perde peu à peu celle des électricités qui est repoussée, et qu'ensuite, la cause décomposante étant subitement détruite, il perde tout à coup, par une seule étincelle, l'autre électricité qui s'est accumulée sur sa surface. C'est ce qu'on vérifie avec un pistolet de Volta disposé en présence des conducteurs de la machine.

213. En touchant les corps conducteurs, lorsqu'ils sont soumis à l'influence, on en peut tirer l'une ou l'autre électricité : mais on ne peut les charger que d'une seule électricité, en les mettant en communication avec le sol. — Reprenons l'un des cylindres isolés de la figure 12, et supposons que ses électricités naturelles soient décomposées par l'influence de la machine : son fluide résineux étant appelé en *r*, son fluide vitré repoussé en *v*, et la *ligne neutre nn'* marquant sur sa surface les points qui séparent les deux fluides contraires. Dans cet état, si on vient le toucher avec un plan d'épreuve, on prendra de l'électricité résineuse dans la région *nr* ; de la vitrée dans la région *nv*, et l'on ne prendrait point d'électricité sensible sur la ligne neutre *nn'*. Mais si, au lieu de toucher le cylindre avec un plan d'épreuve très-petit, on vient le mettre en communication avec le sol, on obtiendra des résultats tout à fait différents : s'il communique au sol par un point de la région *nv*, tout le fluide vitré s'écoule, et le fluide résineux reste en totalité maintenu par l'attraction du fluide vitré de la machine ; s'il communique au sol par un point de la région *nr*, c'est *encore le fluide vitré* qui s'écoule, et le fluide résineux qui reste.

Ce phénomène remarquable, très-facile à vérifier, est aussi

très-facile à expliquer : car le fil de métal qui établit la communication avec le sol éprouve lui-même la décomposition par influence ; son fluide vitré est refoulé dans le sol, tandis que son fluide résineux est attiré, passe sur le cylindre, et neutralise, en s'y répandant, tout le vitré qui s'y trouve ; le résultat est le même que si le cylindre avait été en communication avec le sol avant d'éprouver l'influence des conducteurs de la machine.

Or, si, en touchant la région *nr* avec le plan d'épreuve, qui est très-petit, on en tire de l'électricité résineuse, et si, en la touchant avec le sol, qui est très-grand, on en tire de la vitrée, il faut bien qu'il existe des corps isolés, d'une certaine dimension, qui n'en pourraient tirer ni l'un ni l'autre des fluides.

Cette conséquence est importante, et nous ne la présentons ici que pour indiquer d'avance que, dans la décomposition par influence, le lieu et la forme de la ligne neutre dépendent d'une foule de conditions, et que, dans le contact des corps électrisés, il se produit des phénomènes très-complexes.

214. Électroscopes. — Nous avons déjà fait connaître le pendule électrique, l'aiguille électrique et l'électroscope de Coulomb ; mais on a été conduit, par les phénomènes de l'électricité par influence, à construire d'autres électroscopes qui conservent mieux l'électricité qu'on leur donne, et qui sont plus propres à donner approximativement une idée des forces électriques qui les sollicitent. Tous ces appareils se composent essentiellement d'un *vase de verre*, d'un *conducteur fixe* et d'un *conducteur mobile*.

Le *vase de verre* a la forme d'une cloche ou d'un flacon : l'orifice supérieur est étroit ; et le fond peut être de verre (Fig. 14), mais le plus souvent il est de métal (Fig. 13), et alors il porte deux boules de cuivre, ou bien il communique à deux petites lames d'étain *ee'* qui sont collées verticalement sur les parois intérieures de la cloche.

Le *conducteur fixe* est une petite lame métallique qui se termine en haut par une boule (Fig. 13) ou par un anneau (Fig. 14); elle est mastiquée avec de la gomme laque dans le col du vase, et même, pour plus de précaution, la surface extérieure du verre est vernie jusqu'à une distance *vv'*.

Le *conducteur mobile* est suspendu à l'extrémité inférieure du conducteur fixe ; c'est de sa nature que dépend le nom de l'électroscope : dans l'*électroscope à pailles*, il se compose de

deux pailles légères que l'on suspend au conducteur fixe par de petits anneaux de fil de métal très-fin; dans l'*électroscope à lames d'or*, il se compose de deux lames d'or qui se collent, par simple apposition, sur l'extrémité aplatie du conducteur fixe (Fig. 14); dans l'*électroscope à balles de sureau*, il se compose de deux fils de métal très-fins, qui s'attachent comme les pailles et qui portent à leur extrémité inférieure des petites balles de sureau *bb'* (Fig. 13). Ces conducteurs mobiles viennent, dans leur plus grande divergence, toucher les boules ou les lames d'étain pour se décharger de leur électricité; car s'ils allaient toucher la surface du verre, ils y resteraient adhérents, et lui communiqueraient une électricité qui pourrait pendant longtemps troubler les résultats.

Les expériences dont nous avons parlé précédemment suffisent pour indiquer l'usage des électroscopes.

Lorsqu'on voudra simplement reconnaître la présence de l'électricité dans un corps, il faudra l'approcher graduellement du conducteur fixe de l'électroscope, et observer la divergence toujours croissante des conducteurs mobiles. De deux corps de même forme, placés à la même distance, celui qui produira la moindre divergence aura évidemment la moindre force électrique; mais les intensités ne seront pas proportionnelles aux angles d'écart, elles suivent une loi beaucoup plus compliquée.

Lorsqu'on voudra reconnaître l'espèce d'électricité que possède un corps, il faudra préalablement donner à l'électroscope une électricité connue, ce qui se fait de la manière suivante. On approche un corps électrique, et en même temps on touche avec le doigt le bouton de l'électroscope : le fluide *repoussé* passe dans le sol, et, en retirant *d'abord* le doigt et *ensuite* le corps électrisé, l'électroscope reste chargé du fluide *attiré*, c'est-à-dire, du fluide contraire à celui du corps qu'on lui présente. Dans cet état, tout corps qu'on en approche, et qui augmente sa divergence, est certainement chargé de la même électricité que l'électroscope, mais l'inverse n'a pas lieu : tout corps qui diminue la divergence n'est pas nécessairement chargé d'une électricité contraire à celle de l'électroscope, car les corps conducteurs, pris dans leur état naturel, doivent eux-mêmes produire cet effet sur les conducteurs mobiles, à cause de la décomposition par influence qu'ils éprouvent.

Ainsi, l'augmentation de divergence est une épreuve décisive :

tandis que la diminution est une épreuve incertaine, à moins toutefois que cette diminution ne soit très-grande, et que le corps qui la produit, étant approché davantage, ne soit capable de déterminer une divergence contraire, après avoir ramené jusqu'au contact les conducteurs mobiles de l'électroscope.

Quand l'air est humide, l'électricité se perd promptement, et il serait impossible alors de faire des expériences comparatives avec les électroscopes, si l'on n'avait soin de dessécher l'air qu'ils contiennent, ce que l'on fait avec quelques fragments de chlorure de calcium; et même il est bon de dessécher aussi l'air qui les environne, en les enveloppant d'une cage au fond de laquelle on place des corps propres à absorber l'humidité.

215. Électrophore. — Cet instrument, imaginé par Volta, repose encore sur les principes de l'électricité par influence : il se compose d'un *gâteau* de résine (Pl. 17, Fig. 15), et d'un *plateau p*, auquel est adapté un manche isolant *m*. La résine est coulée dans un moule de bois ou de métal, il importe que sa surface supérieure soit sensiblement plane; le plateau est de cuivre avec un rebord arrondi, ou simplement de bois revêtu d'étain; son diamètre est moindre que celui du gâteau. Après avoir électrisé toute la surface de la résine en la battant avec une peau de chat, on pose sur elle le plateau par son manche isolant, et avec le doigt on en tire une étincelle : c'est son électricité résineuse qui s'écoule dans le sol. Ensuite, en relevant le plateau, on le trouve fortement chargé d'électricité vitrée. On peut répéter l'expérience plusieurs centaines de fois de suite sans qu'il soit nécessaire de donner au gâteau une nouvelle charge avec la peau de chat. L'électricité de la résine, agissant par influence sur les électricités naturelles du plateau, à travers la mince couche d'air qui l'en sépare, y produit une grande décomposition, et l'électricité vitrée qu'elle attire ne peut pas venir la neutraliser, parce qu'elle ne peut pas s'accumuler sur un point pour vaincre la résistance de l'air. L'électrophore vaut à lui seul une machine électrique.

216. Machines électriques. — Les machines électriques se composent d'un corps frottant, d'un corps frotté et d'un conducteur isolé.

Le corps frottant est un coussin élastique rembourré de crin; sa face frottante est un cuir enduit d'*or mussif* (deuto-sulfure

d'étain), ou de divers *amalgames*, parmi lesquels l'amalgame de zinc paraît être de beaucoup le plus efficace.

Le corps frotté est un cylindre ou un plateau de verre.

Le conducteur isolé est en général un système de cylindres creux, de laiton, terminés par des surfaces sphériques ou arrondies, et supportés par des colonnes de cristal vernies à la gomme laque.

Nous allons indiquer les diverses dispositions les plus usuelles.

Machine ordinaire (Pl. 17, Fig. 29). — Le plateau de verre *a*, dont le diamètre peut varier de $\frac{1}{2}$ mètre à 1 ou 2 mètres, est percé en son centre d'un trou dans lequel passe l'axe à manivelle *b*. Les écrous *c* servent à fixer très-solidement le plateau sur son axe. Les montants *d* (Fig. 30) sont disposés pour supporter à la fois le plateau et les deux paires de coussins *e* et *e'*, qui le frottent de chaque côté, depuis la circonférence jusqu'au tiers ou à la moitié du rayon (Fig. 29). Le conducteur *fgf'* (même figure), isolé sur les colonnes *h*, se termine par deux *mâchoires i*, qui embrassent le bord du plateau aux extrémités de son diamètre horizontal.

Pour mettre la machine en activité, on sèche les colonnes *h* et le plateau *a* avec des réchauds, ou en les frottant avec du papier sans colle, sec et très-chaud; on sèche les coussins en les présentant au feu; on les frotte l'un contre l'autre après les avoir enduits d'or mussif ou d'amalgame; on les remet en place, et on y adapte les armatures en taffetas *k* (Fig. 31); on fait ensuite communiquer les coussins au sol au moyen d'une chaîne, et il n'y a plus qu'à tourner la manivelle *m* pour que les conducteurs se chargent d'électricité.

En effet, l'électricité vitrée que le frottement développe sur le plateau agit pour décomposer par influence les électricités naturelles du conducteur, et surtout celle des mâchoires *i*, elle repousse la vitrée, qui se répand sur toute la surface des conducteurs, et attire la résineuse, qui passe des mâchoires au plateau pour le remettre à l'état naturel, ou du moins pour neutraliser d'une manière plus ou moins complète l'électricité vitrée dont il est chargé.

L'électricité résineuse du coussin s'écoule dans le sol, et il est nécessaire qu'elle s'y écoule librement, car, si les coussins étaient chargés d'électricité résineuse, ils développeraient moins d'électricité vitrée sur le plateau.

On emploie quelquefois des *conducteurs secondaires* qui sont des cylindres de cuivre ou de fer-blanc, suspendus au plafond avec des cordes de soie. En mettant ces conducteurs en communication avec ceux de la machine, c'est le système entier qui se charge d'électricité, et l'on peut en tirer des étincelles plus fortes.

Machine de Van-Marum. — Cette machine, représentée (Pl. 17, Fig. 32), diffère de la machine précédente en ce qu'elle est disposée pour recueillir à volonté l'électricité résineuse ou la vitrée, c'est-à-dire l'électricité des coussins ou celle du plateau. Les deux paires de coussins sont alors disposées sur un diamètre horizontal, et portées par les demi-globes en laiton z et z', et il y a deux arcs mobiles, xx' et yy', qui doivent toujours être dans des plans perpendiculaires. Quand l'arc xx' est vertical, yy' est horizontal; il communique aux coussins, et fait passer leur électricité dans le sol, tandis que l'arc xx' et le globe g se chargent d'électricité vitrée. Au contraire, quand xx' est horizontal, yy' est vertical; il communique au plateau, et le remet à l'état naturel, tandis que xx' recueille l'électricité des coussins, qui se répand alors sur le globe g et sur les demi-globes zz'.

Machine de Nairne. — Cette machine (Pl. 17, Fig. 33) est disposée aussi pour donner les deux électricités; mais elle les donne simultanément, sur deux conducteurs différents, v et r. Ici le corps frotté est un grand cylindre de verre a, mobile autour d'un axe horizontal b, et frotté dans le sens de sa longueur par un seul coussin e; on peut y adapter aussi une armature, c'est-à-dire une pièce de taffetas gommé qui empêche le contact de l'air, toujours plus ou moins humide, du lieu où se trouve la machine.

217. Expériences diverses. — Devant le conducteur c de la machine est un timbre t communiquant au sol, et un pendule isolé (Pl. 17, Fig. 16); le conducteur électrisé vitreusement attire d'abord le pendule, le charge d'électricité vitrée, et ensuite le repousse. Le timbre, au contraire, étant, par l'influence du conducteur, électrisé résineusement dans sa partie antérieure, attire le pendule quand le conducteur le repousse, le décharge de son électricité vitrée, pour lui en donner de la résineuse, et le repousse vers le conducteur, qui l'attire à son tour. De là les oscillations rapides du pendule, qui se continuent aussi longtemps que l'on tourne la machine pour électriser le conducteur.

Au lieu du timbre, on peut prendre une boule de métal, et au lieu du pendule, une *araignée* faite avec du liége un peu brûlé à sa surface, et suspendue à un fil de soie. A cause de l'imparfaite conductibilité du liége, les pattes de l'araignée semblent s'attacher pendant quelques instants aux corps électrisés qu'elles touchent (Fig. 17).

Une feuille d'or battu, placée sur un petit plateau de métal communiquant au sol, et à quelques centimètres au-dessous du conducteur de la machine, est alternativement attirée et repoussée, et exécute ainsi une série d'oscillations analogues à celles du pendule. C'est de cette manière que l'on fait la danse des pantins, en disposant de petits bonshommes de liége diversement ornés entre deux plateaux de métal distants d'environ deux décimètres, dont l'un communique au sol, l'autre au conducteur de la machine.

Ces expériences, qui ne semblent que des jeux d'enfants, ont suggéré à Volta une ingénieuse idée pour expliquer le phénomène de la grêle. Nous reviendrons sur ce sujet dans la *Météorologie;* mais nous pouvons dès à présent indiquer l'expérience par laquelle Volta imite les divers mouvements que les grêlons sont supposés exécuter entre les nuages avant de tomber en masse sur la terre : *c* (Fig. 18) est une grande cloche de verre, dont le fond est de métal, et communique au sol; le plateau supérieur *p* communique à la machine, et dès que l'électricité se fait sentir, les balles de sureau qui étaient tranquilles sur le fond, s'élèvent, le touchent, retombent, et s'élèvent de nouveau; pendant qu'elles exécutent ces mouvements alternatifs, elles se heurtent de mille manières, et donnent une idée de cette espèce de cliquetis ou de bruissement que l'on entend dans les nuages quelques instants avant la chute de la grêle.

218. Machine hydro-électrique. — La machine *hydro-électrique* d'Armstrong, dans laquelle l'électricité est produite aussi par le frottement, mais par le frottement d'un jet de vapeur à haute pression, est représentée (Pl. 18, Fig. 30, 31, 32).

Cette machine nouvelle se compose : 1° d'une chaudière à vapeur *a*, isolée (Fig. 32); d'une boîte réfrigérante *b*; de trois becs d'échappement *c*, et d'un conducteur *d*.

La chaudière a environ 8 décimètres de longueur et 4 de diamètre : elle est à foyer intérieur; *f* porte du foyer, *g* cheminée; on a coutume de la chauffer au charbon de bois; elle

est isolée sur les quatre colonnes de verre *v*, qui sont elles-mêmes portées sur un cadre à roulettes *u*; *s* soupape de sûreté; *r* robinet, pour donner issue à la vapeur et mettre l'appareil en expérience; lorsqu'on l'ouvre, la vapeur passe d'abord dans le gros tube *t*, et de là se distribue dans trois petits tubes qui traversent en ligne droite la boîte réfrigérante, et arrive au bec d'échappement qui termine chacun de ces tubes.

La boîte réfrigérante *b* contient de l'eau à la température ordinaire; mais son niveau n'est pas tout à fait assez élevé pour qu'il touche aux tubes à vapeur; seulement des mèches de coton, posées sur ces tubes et plongeant par leurs deux extrémités dans l'eau de la boîte, se mouillent par capillarité, et refroidissent ainsi à un certain degré et les tubes et la vapeur à laquelle ils donnent passage. Les vapeurs qui se produisent dans la boîte se rendent dans la cheminée par le tube *g'*.

Le bec d'échappement est la pièce essentielle, c'est de sa construction que dépend la puissance électrique de la machine; après divers essais, M. Armstrong s'est arrêté à la disposition qui est représentée dans les figures 30, 31. Près de son extrémité, le tube à vapeur s'élargit en cône; et dans ce cône on introduit la pièce représentée en perspective dans la figure 30, et en coupe dans la figure 31; c'est là, à proprement parler, le bec d'échappement; il se compose d'un tronc de cône de bois de perdrix *p*, dont la petite base fait corps avec la pièce de métal *m*. La vapeur arrivant directement contre le métal, se brise; elle est forcée de gagner la fente, et là, se brise de nouveau pour passer dans l'orifice de grandeur convenable qui est dans l'axe du tronc de cône de bois de perdrix; l'anneau à vis *n* ne sert qu'à tenir solidement le bec d'échappement.

En traversant la boîte *b*, le refroidissement a produit quelques fines gouttelettes d'eau qui sont emportées par la vapeur, et il paraît bien constant, par les expériences de M. Faraday, que c'est le frottement de ces gouttes contre le bois de perdrix qui développe l'électricité. Ainsi les gouttes d'eau composent le corps frottant, les parois du bec le corps frotté, et la vapeur n'est que l'agent ou le moteur qui détermine une friction rapide.

Le conducteur *d* a la forme qui est représentée sur la figure; il prend l'électricité à la vapeur; il est lui-même isolé, et c'est sur la boule *k* que l'on va tirer l'étincelle.

On voit encore un autre tube d'échappement *xy*, qui est des-

tiné à introduire diverses substances pulvérulentes sur le chemin de la vapeur, afin d'étudier leur influence sur la nature et sur la quantité d'électricité produite.

Avec les dimensions précédentes qui sont celles d'une machine de Ruhmkorff, très-commode dans les amphithéâtres, on obtient plus d'électricité qu'avec trois machines ordinaires, ayant des plateaux d'un mètre, mus à la vitesse d'un tour par seconde. Nous avons fait établir à la Faculté des sciences une machine beaucoup plus puissante portant 80 becs, dont les énormes étincelles se succèdent si rapidement qu'elles forment un jet continu et éblouissant de plusieurs centimètres de largeur et de plusieurs décimètres de longueur. Ces magnifiques effets ne semblent pas cependant proportionnels à ceux que l'on obtient déjà de la machine de Ruhmkorff.

CHAPITRE II.

Des Forces électriques.

219. Les attractions et les répulsions électriques sont en raison composée des quantités de fluide, et en raison inverse du carré des distances. — Cette loi fondamentale des actions électriques a été découverte par Coulomb, comme la loi fondamentale des actions magnétiques, et c'est par des moyens analogues, savoir, par la balance de torsion, et par les oscillations d'une petite aiguille, qu'il est parvenu à en démontrer la vérité. La balance électrique diffère peu de la balance magnétique : dans la construction de cette dernière, il faut éviter soigneusement l'emploi des corps ferrugineux ; dans la construction de la première, il faut éviter avec le même soin l'emploi des corps conducteurs. On la construit de la manière suivante : sur une table de bois très-sec, on établit par incrustation quatre grandes glaces carrées d'environ 1 mètre de côté (Pl. 17, Fig. 19) ; leurs bords verticaux sont travaillés de manière qu'ils se joignent très-exactement, et on les colle ensemble de peur que l'air n'y puisse trouver quelque issue. Une cinquième glace, un peu plus grande, s'ajuste sur les premières pour fermer exactement l'appareil ; elle est percée de deux ouvertures circulaires, l'une au centre, sur laquelle s'élève un tube de verre *t*, de 30 à 40 centimètres de hauteur, et l'autre sur le côté, par laquelle on introduit les corps électrisés. Au-dessus du tube de verre est un micromètre pareil à celui de la balance magnétique ; le fil de cuivre ou d'argent qui est fixé au treuil de ce micromètre porte à sa partie inférieure une légère aiguille en gomme laque, très-bien équilibrée, et terminée par une petite balle de sureau ou par un disque de clinquant. Sur le contour de la cage, et vers le milieu de sa hauteur est une bande de papier qui porte les degrés. Le fil de torsion doit toujours, comme nous l'avons vu, passer par le centre de ces divisions. Au fond de la balance, on met du chlorure de calcium dans une capsule, pour absorber l'humidité de l'air.

Pour déterminer, avec cet appareil, la loi des répulsions élec-

triques, on donne d'abord de l'électricité à la balle de l'aiguille suspendue ; et ensuite, à l'extrémité d'un tube de verre ou d'une aiguille de gomme laque, est une autre balle électrisée de la même manière, que l'on fait descendre dans la balance, avec la précaution de la maintenir à très-peu près sur la circonférence que la balle mobile peut décrire dans son mouvement révolutif. La répulsion s'exerce entre ces deux balles comme entre deux pôles magnétiques de même nom, et l'expérience s'achève, en effet, de la même manière. En donnant aux balles des électricités contraires, on détermine aussi la loi des attractions électriques comme celles des attractions magnétiques.

Pour démontrer que les attractions et les répulsions sont en raison composée des quantités d'électricité, il faut s'appuyer sur ce principe évident de lui-même : que deux sphères conductrices et de même rayon, qui sont mises en contact, se partagent également les électricités qu'elles possèdent. Ainsi, après avoir observé la force de torsion qui fait équilibre à l'action attractive ou répulsive des deux balles à une distance connue, si l'on vient toucher l'une d'elles avec une troisième balle isolée qui lui soit exactement pareille, on lui enlève la moitié de l'électricité qu'elle possède, et l'on reconnaît que, pour la même distance, la force de torsion se trouve réduite à moitié. En prenant une seconde fois, par le même procédé, la moitié du fluide qui reste encore sur l'une ou sur l'autre des balles, on réduirait encore la force à la moitié de sa valeur ; et, si l'on prenait simultanément la moitié du fluide qui se trouve sur chacune des balles, la force serait réduite au quart de ce qu'elle était.

Coulomb a encore constaté les mêmes lois, avec la même précision, en faisant osciller devant un globe électrisé une petite aiguille de gomme laque suspendue à un fil de soie, et portant à l'une de ses extrémités un disque de clinquant destiné à recevoir l'un ou l'autre fluide. Cet appareil devient tout à fait semblable à celui que nous avons décrit pour le magnétisme : seulement la réaction électrique qui s'exerce alors entre le globe et le disque est la seule cause des oscillations ; d'où il résulte que, pour des charges ou pour des distances différentes, les intensités des forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations que l'aiguille exécute dans le même temps.

220. De la perte de l'électricité par l'air et par les supports. — L'électricité des corps disparaît avec le temps : elle se

dissipe dans l'air ou s'écoule dans le sol; c'est un fait qui se constate par toutes les expériences électriques. Ne pouvant empêcher cette déperdition, nous devons nous attacher à la rendre plus lente, plus régulière et plus mesurable : sans cela, toute comparaison serait impossible entre les forces, puisqu'à chaque instant elles seraient variables et changeraient irrégulièrement suivant des lois inconnues.

La perte, par les supports isolants, se fait en partie au travers de leur substance, et en partie sur la mince couche d'humidité dont ils sont très-souvent revêtus. Cette dernière cause est très-influente pour le verre et la soie, qui absorbent la vapeur d'eau avec une grande avidité. C'est pourquoi il est toujours nécessaire d'enduire la surface de ces corps d'une couche de gomme laque, soit en les plongeant dans de la gomme laque fondue, soit en les couvrant d'un vernis de cette substance : avec cette précaution, les supports de verre et de soie, et ceux de gomme laque pure, isolent à peu près au même degré; il paraît même, d'après les expériences de Coulomb, qu'ils peuvent isoler complétement les faibles charges électriques, lorsqu'ils ont une longueur de 40 ou 50 centimètres, et qu'on prend soin de les chauffer avant l'expérience pour vaporiser l'humidité qui s'y attache. Cependant, puisqu'ils n'isolent complétement que sous la condition d'avoir une grande longueur, il est évident qu'ils s'imprègnent toujours d'une petite quantité d'électricité, et l'on conçoit ainsi qu'une charge plus forte, réagissant sur elle-même avec plus d'énergie, repousse le fluide jusqu'à l'extrémité du support, et le force à passer dans le sol par un écoulement lent et continu. On reconnaît qu'un corps est parfaitement isolé lorsqu'en le soutenant par plusieurs supports il éprouve la même perte que s'il était soutenu par un seul, et l'on est alors bien assuré que la perte qu'il éprouve est due au contact de l'air.

La perte par l'air est due en grande partie à la vapeur d'eau qui est toujours plus ou moins abondante dans l'atmosphère, car elle augmente à mesure que l'hygromètre marche à l'humidité : le fait est si frappant que, par exemple, si l'on souffle sur un tube électrisé ou sur un bâton de résine, il ne reste pas de trace de son électricité; il en est de même quand on souffle sur un corps conducteur isolé ; mais, dans ce cas, il ne faut pas souffler de trop près, de peur de recevoir la commotion. L'électricité qui s'écoule ainsi par la vapeur d'eau se répand de proche en proche

dans l'atmosphère environnante, et il est probable que la transmission ne se fait pas sans que les molécules de vapeur éprouvent une grande agitation. Toute la perte d'électricité qui se fait dans l'air n'est pas due à la présence de la vapeur : l'air le plus complétement desséché laisse encore échapper, avec le temps, une certaine portion du fluide électrique des corps qu'il enveloppe. On en peut faire l'expérience dans la balance de Coulomb, après avoir desséché l'air qu'elle contient, et après avoir électrisé la balle de l'aiguille et la balle fixe. Supposons, par exemple, que ces deux balles soient maintenues à 20° de distance, par une torsion de 250° du micromètre supérieur : la force qui fait équilibre à la répulsion électrique est alors de $250+20=270°$; avec le temps on verra les deux balles se rapprocher, et après 1′ il faudra détordre le micromètre supérieur de 6°, par exemple, pour les remettre à la distance primitive de 20°. Ainsi, en 1′, *la force électrique perdue* sera celle qui fait équilibre à 6° de torsion, et, si l'on veut avoir son rapport à la *force électrique moyenne* qui a lieu pendant cette minute, il suffira de remarquer qu'au commencement cette force était 270° ; qu'à la fin elle était $244+20=264$, dont la moyenne est $\frac{270+264}{2}=267$; d'où il résulte enfin que la perte a été pendant une minute $\frac{6}{267}=\frac{1}{44.5}$, c'est-à-dire un quarante-quatrième à peu près de la force moyenne.

C'est de cette manière que Coulomb est parvenu à évaluer exactement la perte par l'air : dans les jours secs, on trouve souvent qu'elle n'est par minute que $\frac{1}{60}$ ou même $\frac{1}{70}$ de la force moyenne : mais dans les temps un peu humides, elle est quelquefois de $\frac{1}{20}$; alors il est à peu près impossible de faire des expériences exactes. Lorsqu'il y a peu de variations atmosphériques, soit dans la chaleur, soit dans la direction du vent, la perte par l'air reste sensiblement la même dans le cours d'une journée, et l'on peut facilement comparer la perte qui a eu lieu dans la balance à celle qui a eu lieu au dehors sur un corps conducteur électrisé : pour cela, on vient toucher ce corps avec une balle isolée ou avec un plan d'épreuve que l'on reporte à l'instant dans la balance ; on le met en contact avec la balle de l'aiguille, et l'on observe la répulsion ; puis, après quelques minutes, on répète la même expérience, en ayant soin toutefois de remettre à l'état naturel le plan d'épreuve et la balle mobile ; et alors on observe une répulsion moindre, ce

qui est une marque certaine qu'au second contact le corps avait moins d'électricité, puisqu'il en a moins donné au plan d'épreuve. Or, en admettant, comme nous le verrons plus loin, qu'un corps donne au plan d'épreuve qui le touche, *au même endroit* et *de la même manière*, des quantités d'électricité proportionnelles à celle qu'il possède, on voit que les charges électriques du corps, aux deux époques du contact, seront proportionnelles aux forces de torsion, et qu'ainsi il sera facile de déterminer la perte qu'il a éprouvée dans l'intervalle. Ces moyens de comparer les forces électriques, et de calculer ce qu'elles doivent être à chaque instant lorsqu'on sait ce qu'elles sont à une époque donnée, caractérisent une des plus belles inventions qui aient été faites en électricité : c'est par là seulement que Coulomb a pu établir sur des bases certaines les principes fondamentaux de la science.

221. Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs. — L'électricité naturelle est uniformément répandue dans toute la masse d'un corps conducteur, et elle y paraît accumulée en quantité indéfinie, comme la chaleur et le magnétisme : mais, dès qu'un fluide est libre ou séparé de l'autre, il réagit sur lui-même par sa force répulsive, et toutes ses molécules tendent sans cesse à se disperser jusqu'à ce qu'elles trouvent un obstacle qui les arrête. Un corps qui serait parfaitement conducteur n'offrirait dans toute sa masse aucune résistance à cette dispersion, et le fluide, parvenu rapidement à sa surface, en sortirait pour se répandre plus loin s'il y rencontrait encore un espace également perméable : le vide laissant passer l'électricité, un corps électrisé qui serait placé au milieu du vide perdrait à l'instant tout son fluide libre. Ainsi, la terre est probablement, parmi les planètes, la seule qui puisse être électrisée à sa surface, puisqu'elle est la seule qui paraisse avoir une atmosphère autour d'elle. Nous verrons que les métaux eux-mêmes n'ont pas une conductibilité parfaite : cependant, le fluide électrique passe avec une telle rapidité, d'un point à un autre de leur masse, que nous pouvons, du moins pour le moment, supposer que l'électricité dont ils sont chargés n'a aucune résistance à vaincre pour se mouvoir dans leur substance. Il résulte de cette hypothèse que l'électricité libre, développée en un point quelconque d'un conducteur métallique, vient toujours à sa surface, où elle se trouve arrêtée par l'air environnant. Mais com-

ment s'arrange-t-elle dans la masse entière du conducteur? Faut-il, pour l'équilibre, qu'elle s'y répande uniformément, comme l'air se répand dans un ballon? ou bien faut-il que ses molécules, obéissant à leur force répulsive, viennent s'accumuler et se presser contre l'air qui enveloppe sa surface, ou contre les corps non conducteurs qui la couvrent?

Voici trois expériences qui peuvent jeter quelque lumière sur ce point fondamental de la théorie :

1° Un globe isolé (Pl. 17, Fig. 22) est recouvert de deux hémisphères de papier métallique ou de clinquant, que l'on peut à volonté mettre ou enlever au moyen de deux manches de verre v et v' : on l'électrise dans cet état; ensuite on enlève rapidement les hémisphères, et le globe ainsi dépouillé de son enveloppe est aussi dépouillé complétement de son électricité. Donc le fluide se porte à la surface, et s'y accumule de telle sorte qu'il n'en reste pas à l'intérieur.

2° Une sphère de 20 ou 30 centimètres de diamètre, ayant une cavité un peu profonde, est isolée et chargée d'électricité : lorsqu'on vient avec le plan d'épreuve la toucher à sa surface, on y prend du fluide; mais lorsqu'on la touche au fond de la cavité, le plan d'épreuve reste sensiblement à l'état naturel.

3° Enfin, deux sphères conductrices de même rayon sont électrisées ensemble, et ensuite séparées. On vient toucher l'une d'elles avec une sphère pleine, de métal, et l'autre avec une sphère de même rayon que la précédente, mais faite avec du clinquant ou du papier doré, ou simplement en collant des feuilles d'étain ou d'or battu sur un globe de résine. Après le contact, on essaye, avec le plan d'épreuve et la balance, les forces électriques des deux premières sphères, et on les trouve exactement pareilles; donc la sphère pleine, de métal, n'a pas plus enlevé d'électricité à la première, que la sphère *superficielle* n'en a enlevé à la seconde : ce qui est une preuve évidente que l'électricité libre ne réside jamais dans l'intérieur des corps, qu'elle est toujours à la surface, et même qu'elle n'y occupe qu'une épaisseur insensible; car si la couche de fluide électrique devait être plus épaisse qu'une feuille d'or battu, la sphère superficielle n'en prendrait pas autant que la sphère pleine.

Ces preuves expérimentales sont encore confirmées par une preuve mathématique : car cet arrangement du fluide électrique

dans son état d'équilibre est une conséquence rigoureuse de la répulsion, qui agit sur ses molécules en raison inverse du carré de la distance.

De ce que le fluide électrique, repoussé par lui-même, forme à la surface des corps une épaisseur moindre qu'une feuille d'or battu, il n'en faudrait pas conclure que cette épaisseur est insensible, et qu'elle n'entre pour rien dans les phénomènes. Les dimensions qui échappent à la prise directe de nos sens n'en sont pas moins comparables entre elles; et les épaisseurs infiniment petites des couches électriques peuvent être décuples ou centuples l'une de l'autre, comme les épaisseurs qui se comptent par toises ou par mètres. Sur un globe conducteur électrisé (Pl. 17, Fig. 20), tout étant symétrique autour du centre, il est évident que la couche électrique doit avoir partout la même épaisseur; ainsi elle est comprise entre la surface *ee'* du globe, où elle s'arrête contre l'air, et une autre surface *ii'* pareillement sphérique, qui passe *au-dessous* ou *au dedans* de la première d'une quantité infiniment petite : cette surface *intérieure* de la couche électrique est sa surface *libre*. Il semble d'abord qu'une molécule de fluide, telle que *m*, ne puisse être en équilibre dans cet état; mais, en concevant le plan *pmp'*, on verra que, si tout le fluide qui est au-dessus tend, par sa répulsion, à précipiter la molécule *m* vers le centre, tout le fluide qui est au-dessous tend, au contraire, à la repousser vers la surface; et l'on démontre mathématiquement que, par la loi de la raison inverse du carré de la distance, ces deux forces opposées doivent exactement se faire équilibre. Il n'en est pas de même d'une molécule de la surface extérieure : celle-ci est repoussée loin du centre par toutes les molécules du fluide : de là l'effort continuel qu'elle exerce contre l'air ou contre les corps non conducteurs sur lesquels elle s'appuie.

Laplace a démontré que le fluide électrique a une force répulsive qui est partout proportionnelle à son épaisseur, et comme la pression qu'il exerce contre l'air ou contre les obstacles qui l'arrêtent, est en raison composée de sa force répulsive et de son épaisseur, il en résulte que cette pression, en chaque point, ou sur chaque élément de surface, est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche qui se trouve en ce point ou sur cet élément. Ainsi, le fluide électrique répandu sur les corps conducteurs peut être considéré comme les fluides

pondérables contenus dans des vases contre lesquels ils exercent des pressions : quand ces vases sont assez résistants, le fluide est contenu ; quand ils sont trop faibles pour résister à la pression, les parois crèvent et le fluide s'écoule : pour le fluide électrique, le vase est le corps conducteur, la paroi est l'air qui l'enveloppe ou la couche du vernis non conducteur qui le couvre ; et quand l'épaisseur de l'électricité est assez grande, elle fend l'air ou elle perce la couche du vernis, et l'étincelle jaillit, ce qui est la marque d'un écoulement rapide du fluide. Quand la couche électrique est arrêtée et maintenue en équilibre, il est évident que la somme des actions qu'elle exerce sur un point intérieur quelconque est toujours nulle : sans cela, elle opérerait par influence une nouvelle décomposition des fluides naturels qui sont en ce point, et l'équilibre serait troublé.

Sur un ellipsoïde de révolution (Fig. 21), l'épaisseur électrique n'est plus la même aux différents points de la surface. Il résulte des conditions mathématiques dont nous venons de parler, qu'au pôle p et en un point q de l'équateur, les épaisseurs sont entre elles comme les rayons vecteurs cp et cq ; par conséquent, les pressions sont entre elles comme les carrés de cp et cq. Par exemple, si l'ellipsoïde est très-allongé, de telle sorte que $cp = 100\, cq$, la pression au point p sera 10 000 fois plus grande qu'au point q ; c'est donc toujours par l'extrémité la plus amincie de l'ellipsoïde que le fluide devra s'écouler.

Une pointe très-aiguë peut toujours être considérée comme étant le pôle d'un ellipsoïde de révolution très-allongé : ainsi, quelque faible que soit la charge électrique d'un tel corps, le fluide qui s'accumule à son sommet y formera toujours une épaisseur assez grande pour vaincre la résistance de l'air : de là *le pouvoir des pointes*, qui avait été découvert par Franklin avant qu'il fût expliqué par la théorie. On dit quelquefois que les pointes ont le pouvoir d'attirer le fluide électrique ; c'est précisément le contraire qu'il faut dire : elles ont la propriété de laisser écouler le fluide dont elles sont chargées. On peut faire une foule d'expériences sur cette propriété ; nous indiquerons les suivantes :

1° Une pointe aiguë étant placée sur les conducteurs de la machine, il devient impossible de leur donner de l'électricité et d'en tirer des étincelles : le fluide se dissipe par la pointe à mesure qu'il se développe par le mouvement de la machine.

2° Une pointe communiquant au sol, étant présentée aux conducteurs de la machine à 30 ou 40 centimètres de distance, il devient pareillement impossible de les charger : l'électricité des conducteurs décompose par influence les électricités de la pointe ; elle repousse dans le sol celle de même nom, et attire celle de nom contraire, qui s'accumule à la pointe, et qui s'échappe à travers l'air pour venir neutraliser celle du conducteur.

3° Un *timbre à pointe* (Fig. 23) étant sous les conducteurs de la machine, à 1 mètre de distance, le bruit des petits pendules p et p' annonce l'écoulement de l'électricité. Cette expérience est la même que la précédente : les lignes noires représentent sur la figure les fils qui doivent être non conducteurs.

Nous devrons revenir sur les propriétés des pointes lorsque nous parlerons de la lumière électrique, et surtout lorsque, dans la *Météorologie*, nous aurons à étudier l'électricité asmosphérique et la construction des paratonnerres.

Les angles et les arêtes des corps conducteurs présentent des phénomènes analogues à ceux des pointes ; c'est pourquoi il faut éviter soigneusement toutes les formes anguleuses dans les appareils qui sont destinés à conserver l'électricité.

Les résultats précédents nous conduisent à une question générale, dont nous pouvons maintenant comprendre le sens et l'étendue. Des corps conducteurs sont donnés, on connaît leurs formes et leurs grandeurs : les uns sont à l'état naturel, les autres ont des charges connues d'électricité résineuse ou vitrée ; on les met en présence pour former un système connu de position ; on suppose que les fluides réagissent simplement sans passer d'un corps à l'autre ; et l'on demande quel est l'état électrique d'un point quelconque de ce système, c'est-à-dire quelle espèce d'électricité s'y trouve, et quelle épaisseur elle y forme.

Coulomb a donné un moyen expérimental de résoudre ce problème dans toute son étendue. Voici le principe sur lequel il repose : quand un plan d'épreuve, très-mince et assez petit, est posé tangentiellement sur une surface électrisée et retiré perpendiculairement sans la toucher par ses bords, il est chargé sur chaque face d'une épaisseur électrique qui est la moitié de celle que possédait la surface au point de contact. Coulomb a

démontré ce principe, en déterminant le rapport suivant lequel l'électricité se partage entre une sphère et un plan circulaire qui vient la toucher par son centre et qui est retiré perpendiculairement. Mais on peut encore s'en rendre compte d'une autre manière : quand le plan d'épreuve est tangent à une surface, il se confond avec l'élément qu'il touche, il prend en quelque sorte sa place relativement à l'électricité, ou plutôt il devient lui-même l'élément sur lequel le fluide se répand ; ainsi, quand on retire ce plan, on fait la même chose que si l'on avait découpé sur la surface un élément de même épaisseur et de même étendue que lui, et qu'on l'eût enlevé pour le porter dans la balance sans qu'il perdît rien de l'électricité qui le couvre ; une fois séparé de la surface, cet élément n'aurait plus dans ses différents points qu'une épaisseur électrique moitié moindre, puisque le fluide devrait se répandre pour en couvrir les deux faces. Ce principe posé, l'expérience n'exige plus que de l'habitude et de la dextérité : après avoir touché un point de la surface avec le plan d'épreuve, on l'apporte dans la balance, où il partage son électricité avec le disque de l'aiguille qui lui est égal, et l'on observe la force de torsion à une distance connue. On répète la même expérience, en touchant un autre point, et le rapport des forces de torsion est le rapport des répulsions électriques ; on en prend la racine carrée pour avoir le rapport des épaisseurs. Ainsi, le génie de Coulomb a donné en même temps aux mathématiciens la loi fondamentale suivant laquelle la matière électrique s'attire et se repousse ; et aux physiciens une balance nouvelle et des principes d'expérience au moyen desquels ils peuvent en quelque sorte sonder l'épaisseur de l'électricité sur tous les corps, et déterminer les pressions qu'elle exerce sur les obstacles qui l'arrêtent.

Le problème général dont nous venons de parler, et qui peut être dans tous les cas si facilement et si complétement résolu par l'expérience, peut être attaqué aussi par l'analyse mathématique. Poisson a publié deux Mémoires sur ce sujet (*Mém. de l'Institut*, 1811, première et deuxième partie) : en s'appuyant sur la loi de Coulomb, et sur quelques théorèmes fondamentaux de l'attraction des sphéroïdes démontrés par Laplace, il parvient à des équations générales, qu'il résout ensuite, pour le cas d'un ellipsoïde ou de deux sphères.

Dans l'impossibilité où nous sommes de faire connaître ce tra-

vail, même par extrait, nous nous contenterons de citer quelques-uns des résultats les plus remarquables; ils sont d'autant plus décisifs, pour prouver l'exactitude de l'analyse, que Coulomb les avait démontrés par l'expérience (*Mém. de l'Académie*, 1787).

1° Quel que soit le rapport des rayons de deux sphères électrisées, quand elles se touchent, l'épaisseur électrique est nulle au point de contact.

2° A partir du point de contact, l'épaisseur électrique croît lentement; dès qu'elle devient sensible, elle est plus grande sur la sphère du plus grand rayon; mais ensuite, à une certaine distance, elle commence à croître plus rapidement sur la plus petite sphère, de telle sorte qu'elle y est toujours plus grande à une demi-circonférence de distance du point de contact.

3° En ces points, diamétralement opposés au point de contact, le rapport des épaisseurs est d'autant plus grand que la petite sphère est plus petite, mais il tend vers une limite qui est 4,2.

4° Quand on sépare ces sphères, et qu'on les soustrait à leur action mutuelle, l'épaisseur électrique est toujours plus grande sur la plus petite; le rapport de ces épaisseurs tend pareillement vers une limite qui est $\frac{5}{3}$.

5° Quand on écarte seulement ces sphères à des distances diverses, de manière qu'elles restent soumises à leur influence mutuelle, leur électricité commune étant, par exemple, la vitrée, la petite sphère prend l'électricité *résineuse* au point *le plus voisin* de la grande sphère, et à une certaine distance autour de ce point; elle continue d'être électrisée *résineusement dans cette partie* à mesure qu'on l'éloigne, mais de moins en moins; quand l'intervalle qui sépare les sphères est (dans les circonstances les plus favorables) égal à peu près au demi-rayon de la plus grande, l'électricité résineuse disparaît; et, au delà, la petite sphère devient vitrée sur toute sa surface, comme la plus grande. Quand le rayon de la petite sphère surpasse le sixième du rayon de la grande, l'électricité résineuse paraît encore, mais elle disparaît avant que l'intervalle des sphères soit égal au demi-rayon de la plus grande.

6° Quand une petite sphère, prise à l'état naturel, est électrisée par l'influence d'une sphère plus grande, elle réagit sur

celle-ci pour troubler l'épaisseur uniforme de sa couche électrique, et alors cette épaisseur va en décroissant depuis le point le plus voisin de la petite sphère jusqu'à une distance de $\frac{3}{4}$ de circonférence; au delà, elle devient croissante jusqu'au point diamétralement opposé.

CHAPITRE IV.

De l'Électricité dissimulée.

222. De la dissimulation de l'électricité, et de sa recomposition lente et subite. — Concevons deux disques conducteurs *a*, *a'* (Pl. 18, Fig. 1), mis en présence et séparés par une lame non conductrice *n* de verre ou de résine ; quand le disque *a* reçoit, par exemple, de l'électricité vitrée, et le disque *a'* de la résineuse, ces deux électricités s'attirent au travers de la lame non conductrice *n*, et en pressent les deux faces opposées par l'effort qu'elles font pour se rejoindre : on dit alors que ces électricités sont *dissimulées*. Et, en effet, quand les disques sont chargés, on peut les toucher l'un ou l'autre sans que leur fluide s'écoule dans le sol, mais il faut les toucher *séparément* et non pas *simultanément ;* le fluide de celui qui est touché n'obéit pas à la force répulsive qui lui est propre, parce qu'il est attiré et retenu par le fluide de l'autre. Ainsi, les plus fortes charges électriques s'accumulent sur les disques, se pressent sur les faces opposées de la lame non conductrice, et restent dissimulées l'une par l'autre tant que l'on n'offre d'issue dans le sol qu'à *l'un* des deux fluides. Supposons que les deux disques soient mathématiquement de même forme et de même grandeur ; que la lame *n* soit bien plane sur ses deux faces, et partout également épaisse ; et que la machine ou la source quelconque qui donne de l'électricité vitrée au disque *a*, par le moyen du fil *f*, soit exactement de même force que celle qui donne de l'électricité résineuse au disque *a'* par le fil *f'*, de telle sorte que tout soit symétrique de part et d'autre du plan qui passe au milieu de l'épaisseur *n* : alors, il est évident que les deux disques auront toujours des charges égales, et que dans les points symétriquement placés sur chacun d'eux, les épaisseurs ou les tensions électriques seront aussi toujours les mêmes. Cela posé, voici un principe fondamental de l'électricité dissimulée : c'est qu'après avoir donné à l'appareil une charge quelconque, et l'avoir isolé ensuite en supprimant la communication des fils *f* et *f'* sans les laisser tou-

cher au sol, il arrive toujours que la *dissimulation est incomplète*, c'est-à-dire qu'il n'existe aucun point sur les disques ni sur les fils où la tension électrique soit tout à fait nulle. Cette tension est très-grande sur les faces intérieures *i* et *i'*; et là, quand les surfaces ont assez d'étendue, les fluides peuvent presser la lame *n* avec tant de force qu'ils s'ouvrent un passage au travers de sa substance et la percent pour se rejoindre : si cette lame est de résine ou de soufre, il se fait alors une multitude de petites fissures imperceptibles; mais si elle est de verre mince, les fluides ne font qu'un seul trou, par lequel ils se précipitent avec éclat pour se recomposer. Sur les faces extérieures *e*, *e'*, et sur les fils *f*, *f'*, la tension électrique qui s'exerce contre l'air est très-faible en comparaison de la tension intérieure; mais elle existe, comme on peut s'en assurer avec le plan d'épreuve, ou même en présentant la jointure du doigt successivement à chaque disque ou à chaque fil, car on en tire de petites étincelles. La dissimulation ne peut pas être complète, parce que les fluides accumulés pour la plus grande partie sur les faces intérieures *i* et *i'* restent encore séparés par l'épaisseur de la lame non conductrice *n*, et que c'est au contact seulement qu'ils peuvent être neutralisés en totalité l'un par l'autre. Ainsi, la dissimulation est d'autant plus parfaite que la lame non conductrice est plus mince; en même temps, plus la lame est mince, et moins elle offre de résistance à la pression électrique. C'est là, comme nous le verrons tout à l'heure, ce qui limite l'accumulation que nous pouvons donner à l'électricité.

L'appareil étant chargé comme nous venons de le dire, les électricités dissimulées peuvent se recomposer subitement ou lentement.

La *recomposition subite* se détermine de la manière suivante : on prend par ses manches isolants *m*, *m'*, *l'excitateur beb'* (Fig. 2), dont les deux arcs en cuivre *bc*, *eb'* sont mobiles autour de la charnière *c*; on touche l'un des disques avec la boule *b*, et on approche de l'autre disque la boule *b'* à 4 ou 5 centimètres de distance; l'étincelle jaillit avec beaucoup d'éclat et de bruit, et l'appareil est déchargé. Par la tension électrique qui est au point de contact *b*, une partie du fluide vitrée se répand sur tout l'excitateur; alors, le fluide résineux est moins attiré qu'il n'était, son épaisseur diminue sur la face *i'* et augmente sur la face extérieure *e'*, d'où il attire le fluide vitré qui est en *b* : cette attraction

fait affluer le fluide vitré vers b', il s'accumule en cet endroit, il diminue sur le disque a, et en même temps le fluide résineux, devenu plus libre, se porte et s'accumule vers la face extérieure de a' où il est maintenant attiré; enfin, la tension est assez forte pour s'ouvrir un passage dans l'air, et tout le fluide se précipite et se recompose à l'instant.

La *recomposition lente* offre des phénomènes curieux; et montre mieux encore le jeu des électricités dissimulées. Les disques étant électrisés et isolés (Fig. 3), deux petits pendules p, p' communiquant avec leurs faces extérieures éprouvent une répulsion produite par l'électricité qui est libre sur ces faces; en touchant le disque a, par exemple, on en tire une petite étincelle, le pendule p retombe, et le pendule p' se relève à l'instant comme si le disque a' eût pris une charge nouvelle; mais cet accroissement de répulsion résulte seulement du fluide résineux qui est devenu libre par la perte de vitré qu'a éprouvée le disque a, on touche ensuite le disque a', son pendule retombe, et celui de a se relève; on retourne au disque a, le même phénomène se reproduit; et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'appareil soit complétement déchargé.

Nous avons supposé que les disques recevaient de l'électricité, l'un d'une source résineuse, et l'autre d'une source vitrée, et que chacun d'eux en recevait des quantités égales, mais le plus souvent on n'emploie qu'une seule machine : le disque a, par exemple, est mis en communication avec elle, et le disque a' en communication avec le sol; alors celui-ci se charge *par influence*, et la charge qu'il prend est toujours moindre que la charge de a. Quand les communications sont rompues, le pendule p' est au repos, et le pendule p diverge; mais la perte de l'air se trouvant proportionnellement plus grande sur le disque a, on voit son pendule s'abaisser peu à peu, tandis que le pendule p' se relève, et, l'égalité de divergence une fois établie, la perte par l'air devient égale; les deux pendules retombent ensemble, d'autant plus lentement que l'air est plus sec. Au lieu de deux disques séparés par une lame de verre, on peut employer, pour les expériences précédentes, un simple carreau de verre sur les faces duquel on colle des feuilles d'étain, en laissant à découvert sur les bords un espace que l'on vernit pour augmenter son inconductibilité (Fig. 4).

223. Des condensateurs. — Tous les appareils dans lesquels

on accumule de l'électricité dissimulée se composent essentiellement de deux lames conductrices, séparées par une lame non conductrice, et on les nomme en général des *condensateurs*, parce qu'en effet le fluide électrique paraît se condenser en se dissimulant. Ces appareils changent de forme et de nom suivant les usages auxquels on les destine.

Ceux qui nous ont servi aux expériences précédentes (Fig. 1, 2, 3, 4) sont des *condensateurs à lames de verre;* ils sont capables d'accumuler de grandes quantités d'électricité, mais, à cause de l'épaisseur du verre, ils ne peuvent être chargés que par des machines, par des électrophores, ou en général par des sources électriques d'une grande tension.

Le *condensateur à taffetas* (Fig. 5) est composé d'un disque de bois *bb'* revêtu d'un taffetas vernissé *tt'*, et d'un plateau conducteur *cc'* à manche isolant *m*. Le plateau étant mis en communication avec une source électrique, soit directement, soit au moyen de la tige à boule *gb*, le fluide se répand sur toute sa surface, agit par influence, au travers du taffetas, sur les électricités naturelles du disque de bois qui doit communiquer au sol, et l'appareil se charge en raison de la tension de la source qui lui fournit du fluide. Ensuite, on soulève le plateau perpendiculairement pour le séparer du taffetas, et pour reconnaître, par l'électroscope ou par la balance, l'espèce et la quantité de l'électricité qui le charge. Le taffetas est moins épais que le verre, mais aussi il est moins solide; d'où il résulte que ce condensateur prend toujours plus d'électricité que le précédent, et qu'il ne peut jamais résister à des charges aussi fortes : il est bon pour essayer le fluide des sources qui n'ont pas une grande tension.

Le *condensateur à lames d'or* (Fig. 6) n'est autre chose qu'un électroscope à lames d'or sur lequel on adapte deux plateaux métalliques, minces et bien dressés : le supérieur *cc'* est mobile et s'enlève par un manche isolant, l'inférieur *ff'* est fixé à la garniture *gg'* de la cloche *hh'*, et la lame non conductrice qui les sépare est disposée avec beaucoup d'art et de soin. Après avoir séparé les plateaux, on les enduit successivement, avec un pinceau, de plusieurs couches d'un vernis très-liquide formé par la dissolution de la gomme laque dans l'alcool : ce vernis sèche, et la pellicule qu'il forme est suffisante pour arrêter l'électricité; son épaisseur n'est pas d'un dixième de millimètre. Ainsi, les plateaux sont presque en contact, et la dissimulation de l'électricité

est aussi complète qu'il soit possible : à cet égard, le condensateur à lames d'or est le plus parfait que l'on connaisse ; mais, les couches minces de vernis n'offrant que très-peu de résistance, il ne peut supporter que les plus faibles charges. Pour les expériences délicates, il est bon de tenir la cloche du condensateur enveloppée d'une cage de verre dans laquelle on dessèche l'air avec quelque corps absorbant.

Le condensateur de Peltier (Fig. 7) a aussi une grande sensibilité, et peut dans quelques circonstances remplacer avantageusement le précédent; il n'en diffère point par les plateaux, mais par l'appareil mobile qui accuse la présence de l'électricité. Ici cet appareil est renfermé sous une cage cylindrique de verre *a*; il se compose de la tige courbe *bcd*, isolée dans le support de bois qui porte la cage, et qui, prenant l'électricité du plateau inférieur, la conduit en *b*; là se trouve une aiguille de cuivre, mobile et très-légère, qui repose, par un pivot d'acier, sur une plaque, pareillement d'acier et un peu concave, fixée sur l'extrémité *b* de la tige *bcd*. Pour que cette aiguille ne soit pas folle, mais pour qu'elle possède une faible force directrice, on y adapte près du pivot un bout de fil d'acier très-fin et un peu aimanté. L'appareil doit être orienté, pour que la force directrice amène le disque de clinquant qui termine l'aiguille de cuivre, légèrement en contact avec la tige *bcd*. Alors on comprend que le disque et la tige, chargés de la même électricité, se repoussent et déterminent un écartement dépendant de l'intensité de la charge. Un cercle divisé indique l'angle parcouru par l'aiguille, et un cercle pareil, portant des divisions correspondantes, tracé sur la partie supérieure et plane de la cage de verre, permet de faire la lecture sans erreur de parallaxe.

Peltier avait essayé de donner encore plus de sensibilité à son appareil au moyen d'un second disque de clinquant, maintenu à l'état naturel, et suivant à volonté les mouvements du premier. Ce but est atteint au moyen de la tige extérieure *t*, qui se meut à la main et qui fait corps avec une tige verticale passant par l'axe du socle, portant elle-même un bras de levier horizontal, à l'extrémité duquel se trouve le second disque de clinquant.

Enfin, l'on peut aisément transformer cet appareil en balance de torsion.

Doubleur de Bennet. — C'est à Bennet que l'on doit les pre-

miers électroscopes à feuilles d'or. Cet observateur habile et ingénieux essaya de les rendre plus sensibles encore, par un artifice au moyen duquel il espérait doubler indéfiniment les plus faibles charges électriques ; mais Cavallo s'aperçut bientôt que des causes accidentelles concouraient infailliblement à produire les effets observés, et que le doubleur ne pouvait inspirer aucune confiance. L'opinion de Cavallo a été pleinement justifiée ; et si je donne ici le doubleur de Bennet, c'est pour montrer combien il faut être circonspect dans l'usage des condensateurs. Cet appareil (Pl. 17, Fig. 8, 9, 10, 11) est un condensateur à trois plateaux : le plateau inférieur *f* qui reste immobile et toujours en communication avec les lames d'or, puis un plateau moyen *m* à manche isolant horizontal, enfin le plateau supérieur *p* à manche isolant vertical. On s'en sert d'abord (Fig. 9), avec les plateaux *m* et *f*, *m* communiquant avec le sol, et *f* avec la source électrique ; puis l'on enlève *m* avec l'électricité dissimulée qu'il possède, et on le met en contact avec *p* (Fig. 10), que l'on fait communiquer au sol ; *p* se charge ainsi de la même électricité que *f* ; alors, rapportant *m* sur *f*, on fait communiquer *p* avec *f* dont la charge est par là augmentée et comme doublée ; par conséquent *m* se charge davantage, et on peut répéter ainsi l'opération jusqu'à ce que la charge soit suffisante.

224. De la bouteille de Leyde, et des batteries électriques. — Un vase de verre, revêtu à l'extérieur d'une feuille d'or ou d'étain montant jusqu'à quelques centimètres des bords, et pareillement revêtu à l'intérieur, ou seulement rempli de quelques substances conductrices, d'eau, de grenailles de plomb, de feuilles d'or ou de clinquant, forme ce qu'on appelle une *bouteille de Leyde* (Fig. 12), ou une *jarre électrique* (Fig. 13) ; la tige *tb* s'appelle le *bouton*, le *crochet* ou l'*intérieur* de la bouteille, parce qu'elle sert en effet à mettre la face intérieure en communication avec le sol ou avec les sources électriques ; tout l'espace compris entre le goulot *g' g* et l'*armature extérieure aa'* est verni avec beaucoup de soin.

Pour charger la bouteille, on la tient à la main par la *panse* ou par l'armature extérieure, et l'on met le bouton en communication avec les conducteurs de la machine, soit au contact, soit plutôt à une petite distance, afin de voir jaillir une foule d'étincelles qui se succèdent rapidement d'abord, puis qui se ralentissent de plus en plus, et qui indiquent ainsi le degré de

la charge. L'électricité vitrée des conducteurs passe dans la bouteille, se répand sur toute la surface intérieure, et de là, agissant par influence à travers l'épaisseur du verre, elle décompose les électricités naturelles de l'armature extérieure, attire la résineuse, qui s'accumule et se condense sur la paroi du verre, et repousse la vitrée, qui s'écoule dans le sol par la main et par le corps qui lui offrent un passage. On pourrait charger la bouteille en sens inverse, en tenant le crochet à la main et en présentant la panse aux condenseurs; mais, dans tous les cas, la communication de l'une des faces avec le sol n'est pas moins essentielle que la communication de l'autre avec la machine. Quelquefois la bouteille se décharge spontanément avec beaucoup d'éclat : tantôt l'étincelle part entre le bouton et l'armature extérieure, alors on peut recommencer la charge; tantôt elle part à travers l'épaisseur du verre, alors la bouteille est percée et hors service.

Quand la bouteille est chargée, on la pose avec précaution sur un isoloir, et on peut la décharger subitement avec l'excitateur, ou lentement, en tirant alternativement de la panse et du bouton une foule de petites étincelles.

L'électricité dissimulée ne reste pas sur les armatures intérieure et extérieure; elle les quitte pour s'attacher au verre et se presser sur sa surface. C'est ce que l'on démontre au moyen de la bouteille à *armatures mobiles* (Fig. 14). Après l'avoir chargée et posée sur un isoloir, on enlève l'intérieur, qui n'emporte avec lui que très-peu d'électricité; on enlève ensuite le verre, en laissant sur l'isoloir l'enveloppe extérieure, qui ne donne pareillement que de faibles signes électriques. Mais les deux armatures ayant été touchées et remises à l'état naturel, si l'on rapporte le verre dans l'armature extérieure, et l'armature intérieure dans le verre, la bouteille ainsi recomposée a presque la même charge qu'elle avait primitivement ; ce qui prouve d'une manière frappante que, dans la séparation des pièces, ces deux électricités étaient restées attachées à la surface du verre : on pourrait encore s'en assurer en étendant une main dans l'intérieur du verre, et l'autre à l'extérieur, lorsqu'on vient de le dépouiller de ses armatures, car on ne manquerait pas de recevoir une forte commotion.

Lorsqu'on présente à la bouteille plusieurs conducteurs pour la décharger, l'électricité choisit toujours le meilleur. Ainsi, en

pressant avec une main une chaîne ou fil de métal sur la panse, on peut impunément, avec l'autre main, apporter au bouton l'autre extrémité de la chaîne ou du fil, la décharge passe par le métal et jamais par le corps; cependant il est toujours bon de s'assurer d'avance qu'il n'y a pas de solution de continuité dans le métal, ou qu'il n'est pas trop mince pour laisser passer tout le fluide, car un fil excessivement fin ne suffirait pas pour détourner le coup.

On mesure la charge d'une bouteille par la distance à laquelle jaillit l'étincelle entre le bouton intérieur et un autre bouton communiquant avec l'extérieur (Fig. 18). La tige *tq* est divisée : on l'avance doucement au moyen de la vis *v*, et l'on observe la distance à laquelle l'étincelle est partie. Pour que les expériences fussent comparatives, il faudrait que, la boule *b* restant la même, tous les boutons des diverses bouteilles eussent les mêmes dimensions.

Nous rapporterons maintenant diverses expériences dont on pourra facilement se rendre compte au moyen de ce qui précède.

Dans le *carillon* de la figure 19, l'un des timbres communique à l'extérieur de la bouteille, et l'autre à l'intérieur. La petite balle de métal est suspendue par un fil isolant. Les oscillations sont d'autant plus rapides, que la distance des timbres est plus petite; par un temps sec, et pour de médiocres charges, on en peut toujours compter plusieurs centaines.

L'*araignée de Franklin*, dont nous avons déjà parlé, peut remplacer la petite balle de métal de l'expérience précédente.

Les *figures de Leichtemberg* semblent indiquer une différence essentielle entre les deux électricités résineuse et vitrée : on peut les obtenir avec un conducteur ordinaire communiquant à la machine, mais on les obtient plus belles et plus régulières au moyen de la bouteille de Leyde. Pour cela, on prend une bouteille chargée, et l'on trace des figures sur un gâteau de résine très-sec : d'abord avec le bouton, qui contient, par exemple, l'électricité vitrée; et ensuite avec la panse, qui contient l'électricité résineuse. Après cela, avec un soufflet qui contient un mélange de soufre et de minium très-bien pulvérisé, on souffle sur le gâteau de résine, et l'on distingue alors les traces électriques que la bouteille a laissées sur la résine. Les traces vitrées deviennent jaunes et les résineuses deviennent rouges, parce

que, dans la poudre mélangée, le soufre est électrisé résineusement, et le minium vitreusement. Ces traces sont très-différentes; les jaunes sont comme *hérissées* en filets divergents, tandis que les rouges offrent des contours arrondis.

Le *perce-carte* (Fig. 27) offre un phénomène curieux : chaque pointe étant mise en communication avec l'une des faces de la bouteille, l'étincelle part, et la carte est percée d'un trou plus grand qu'un trou d'épingle; des deux côtés, on observe autour du trou un petit bourrelet et des filaments tirés en dehors, comme si le fluide était parti du milieu de la carte pour sortir par ses deux faces. M. Œrsted explique ce fait et beaucoup d'autres analogues, en supposant que l'électricité n'éprouve pas un mouvement de translation dans les corps, mais seulement un mouvement de vibration par lequel s'opèrent, autour de chaque molécule, des décompositions et recompositions successives. Ainsi le fluide vitré qui se présente au point *a* décompose les fluides naturels des molécules qu'il rencontre, attire le résineux avec lequel il se recombine par une étincelle, repousse le vitré, qui va à son tour décomposer les fluides naturels des molécules suivantes, attirer le résineux pour se recombiner avec lui par une nouvelle étincelle, et repousser le vitré, et ainsi de suite; de sorte qu'il y a autant d'étincelles que de molécules de matière pondérable. On peut rendre cette supposition sensible en faisant passer la décharge électrique par des grains de métal enfilés dans la soie, et séparés l'un de l'autre.

Nous reviendrons plus tard sur cette importante théorie, qui semble confirmée par tous les faits de l'électricité chimique.

Le trou de la carte ne se fait pas à égale distance des deux pointes; mais, dans l'air ordinaire, il se fait toujours près de la pointe résineuse, et, dans l'air raréfié sous la cloche de la machine pneumatique, il s'en éloigne pour se rapprocher de plus en plus de la pointe vitrée. Ce fait, constaté par M. Trémery, reste sans explication.

Pour percer le verre par la décharge électrique, on change un peu la disposition de l'appareil précédent, parce qu'il est alors nécessaire de mettre à l'extrémité de l'une des pointes une goutte d'un liquide conducteur, une goutte d'huile, par exemple, qui touche immédiatement le verre dans une étendue un peu considérable.

Le *perce-verre* est représenté dans la figure 26.

On enflamme les liqueurs spiritueuses avec la bouteille de Leyde plus sûrement qu'avec l'étincelle directe du conducteur de la machine. On peut même enflammer du coton roulé dans le lycopode et dans la résine pulvérisée.

C'est au moyen de la bouteille de Leyde que l'on a essayé d'apprécier la vitesse avec laquelle le fluide électrique se transmet dans les corps. Des fils de métal isolés, dont l'ensemble forme une lieue, transmettent instantanément la décharge électrique. Ces expériences furent faites en France et en Angleterre, de 1745 à 1750. A cette époque, on essaya pareillement la transmission de l'électricité par l'eau et par le sol sec ou humide. En partant d'un point donné, un fil de métal de plusieurs centaines de toises de longueur, isolé sur des morceaux de bois très-sec, s'en allait s'enfoncer dans le sol par son autre extrémité, après avoir traversé des rivières et des terrains de différentes natures; au point de départ, il était mis en communication avec l'une des faces de la bouteille, tandis que le sol était mis en communication avec l'autre face; les fluides ne pouvaient se joindre qu'après avoir traversé toute la longueur du fil métallique et toute l'étendue du sol et de l'eau, depuis la seconde extrémité du fil jusqu'au lieu de l'observation; et, malgré tant d'espace et tant d'obstacles, la décharge de la bouteille était instantanée, comme si elle eût été faite par l'excitateur ordinaire. Dans un point quelconque de cette longue chaîne, on pouvait enflammer des liqueurs spiritueuses, et c'était alors un spectacle fort étonnant de voir l'alcool s'enflammer par du feu qui venait de traverser une rivière.

La *commotion* de la bouteille de Leyde est assez forte pour être dangereuse; elle passe par les bras et la poitrine, lorsqu'une main tenant la panse de la bouteille, l'autre en vient toucher le bouton. Alors les faibles charges se font sentir dans l'avant-bras seulement, les charges un peu plus fortes se font sentir au coude, et les charges plus fortes encore donnent une vive douleur à la poitrine. Pour faire passer la commotion entre deux points donnés du corps, il suffit d'établir des armatures sur ces deux points, c'est-à-dire des plaques de métal que l'on fait communiquer aux deux faces de la bouteille.

Lorsque plusieurs personnes forment la *chaîne* en se tenant par la main, si la première touche la panse de la bouteille et la dernière le bouton, tout le cercle reçoit instantanément la commotion.

Les personnes qui sont au milieu éprouvent un choc un peu moins vif que celles qui touchent la bouteille. On était autrefois fort curieux de savoir jusqu'où pouvait s'étendre cette puissance du choc électrique, et, après l'avoir tenté sur des cercles nombreux, on l'essaya sur un régiment rangé en bataille, qui fut, dit-on, renversé d'un seul coup.

Les *batteries électriques* (Pl. 18, Fig. 20) sont des réunions de plusieurs bouteilles de Leyde, ou de plusieurs jarres, dont tous les intérieurs communiquent au moyen des tiges de métal t, t', t'', et dont les extérieurs communiquent pareillement, parce que le fond de la caisse de bois b, b', sur lequel ils reposent, est une lame de plomb. Lorsqu'on veut charger ensemble plusieurs batteries, on fait communiquer tous les intérieurs entre eux et tous les extérieurs au sol; et, pour juger le degré de charge, on emploie le petit électromètre à pendule (Fig. 15), qui s'ajuste sur les conducteurs de la machine. Au commencement, et pendant les premiers tours du plateau, le pendule est presque au repos, parce que les batteries condensent tout le fluide qui se développe; mais peu à peu le pendule s'élève, et, par les divers angles d'écart qu'il prend, on juge des divers degrés de sa tension électrique, et par conséquent des divers degrés de tension de l'intérieur des batteries, car celles-ci sont toujours dans le même rapport que les premières. L'électromètre à engrenage (Pl. 18, Fig. 16, 17) donne des indications plus précises. La branche mobile a est un tube très-mince de métal terminé en bas par une boule creuse, et en haut par un contre-poids, en sorte qu'elle est très-mobile et offre toujours la même résistance; elle porte une roue dentée qui engrène avec la roue, quatre fois plus petite, dont est muni l'axe central sur lequel est aussi montée l'aiguille; ainsi l'angle décrit par l'aiguille b sur le cadran c est quatre fois plus grand que l'angle d'écart.

Une batterie peut se décharger comme la bouteille de Leyde, soit lentement, soit rapidement; mais il faut redoubler de précaution pour n'en pas recevoir le choc. L'épaisseur du verre des jarres et la tension de la machine restant les mêmes, la force d'une batterie peut être évaluée par l'étendue de la surface qui se charge; cent mètres carrés condensent cent fois plus d'électricité qu'un sel mètre carré, et il faut un homme fort robuste pour soutenir, sans danger, le choc de quelques décimètres carrés chargés par une machine ordinaire.

Nous allons indiquer quelques-uns des phénomènes les plus remarquables que l'on peut produire au moyen de ces grandes accumulations d'électricité.

Tous les corps qui reçoivent le choc sont placés entre les deux branches *g* et *h* de l'*excitateur universel*, qui est représenté dans la figure 21. L'une de ces branche communique avec l'extérieur de la batterie au moyen de la chaîne *c*; l'autre communique avec une chaîne *c'*, qui se termine à la boule isolée *s*. Lorsqu'on veut faire passer l'étincelle, on prend la boule *s* par l'extrémité de son manche isolant, on l'approche subitement de l'intérieur de la batterie; l'étincelle part, et les fluides se recomposent dans tout le circuit *s*, *c'*, *g*, *h*, *c*.

Un fil de fer de plusieurs centimètres de longueur étant mis entre les branches de l'excitateur, une faible décharge l'échauffe, une forte le fait rougir, une plus forte le fait jaillir en petits globules fondus qui sont lancés au loin, et une plus forte encore le fait disparaître en vapeur. Avec une puissante machine, Van-Marum en a fondu 15 à 20 mètres de longueur. On peut même le fondre dans l'eau, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 29; mais la longueur fondue est toujours moindre, car dans l'instant si court de la décharge, l'eau prend au fil de fer une partie notable de sa chaleur.

Une bande étroite de feuille d'étain, de 8 ou 10 centimètres de longueur, est volatilisée par une batterie ordinaire; la vapeur s'oxyde, et forme de longs filaments flottants dans l'air, semblables à des toiles d'araignée.

Les autres métaux peuvent aussi s'échauffer, rougir, se fondre, s'oxyder; mais, en les prenant de même longueur et de même diamètre, des charges égales ne produisent pas sur tous les mêmes effets : ceux qui sont plus mauvais conducteurs, comme le platine et le fer, éprouvent, à égalité de dimensions, de plus grands effets de chaleur que l'or et le cuivre qui sont les meilleurs conducteurs.

Les fils de soie dorés présentent un phénomène singulier qui montre avec quelle rapidité les molécules de matière conductrice sont saisies par le choc électrique : l'or qui les couvre est volatilisé sans que la chaleur soit seulement capable de rompre la soie. Pour rendre cette expérience plus sensible, on appuie sur le fil une feuille de papier blanc, sur laquelle on voit, après le choc, une large trace de couleur brune. Par le même moyen, on peut

enlever la dorure sur un livre ou sur une autre surface non conductrice, pourvu qu'elle n'ait pas trop d'étendue.

On se sert de cette propriété pour faire des *empreintes électriques* : *dcpr* (Fig. 22) est une *découpure* en papier, à laquelle sont collées deux bandes de feuilles d'étain *f*, *f'* : d'un côté, on la couvre d'une feuille d'or, qui touche l'étain par deux de ses bords ; de l'autre, on la couvre d'un ruban de satin blanc ; et, pour assurer le contact, on met tout ce système sous la *presse pp'* (Fig. 23). Les deux bandes d'étain étant mises en communication avec les deux faces de la batterie, l'étincelle part, l'or se volatilise, et, par tous les *jours* de la découpure, sa vapeur passe sur le ruban où elle fait une empreinte de couleur brune très-régulière.

Les fortes charges font une impression remarquable sur les masses métalliques. Priestley a observé qu'elles en liquéfient la surface à l'endroit où elles les traversent : si le métal est peu fusible, on n'aperçoit, après le passage de l'étincelle, qu'un *cercle de fusion* de quelques millimètres de diamètre ; mais, s'il est très-fusible, comme le plomb, l'étain, on aperçoit autour du cercle central jusqu'à trois *anneaux de fusion*, d'une largeur sensible, concentriques, et séparés les uns des autres par des intervalles d'environ 3 millimètres.

Quand l'étincelle passe dans un liquide, elle éclate et brille comme dans l'air ; presque toujours le liquide est lancé de toutes parts avec une grande force.

Elle éclate de même dans la *poudre à tirer* et en détermine l'explosion. L'on en peut faire l'expérience avec de petites cartouches de 4 ou 5 millimètres de diamètre, et de 40 ou 50 millimètres de longueur : deux fils de fer, traversant les bouts opposés de la cartouche, viennent aboutir vers son milieu à une petite distance l'un de l'autre ; c'est en franchissant leur intervalle que l'étincelle enflamme la poudre.

En passant dans l'eau une forte décharge la projette au loin ; cette expérience se fait avec l'appareil qui est représenté dans la figure 25.

Dans les gaz, l'étincelle produit une expansion si grande et si subite qu'elle peut lancer une petite balle au moyen du *mortier électrique* qui est représenté (Fig. 24). Kinnersley, qui observa le premier ce phénomène remarquable, inventa aussi un appareil pour en mesurer l'intensité : c'est un tube de verre, fermé et armé par ses deux bouts (Fig. 28) ; l'étincelle part entre les deux

boules b, b', et un liquide qui s'élève en même temps dans le tube latéral tt' donne la mesure de l'expansion. Cet appareil se nomme le *thermomètre de Kinnersley*.

Les mauvais conducteurs sont percés ou brisés par la décharge d'une forte batterie : une pierre plate, de plusieurs millimètres d'épaisseur, est percée comme le verre mince ; un cylindre de bois, de 10 ou 12 centimètres de diamètre, peut être fendu en éclats par une décharge qui passe dans le sens des fibres.

A la surface de quelques substances l'étincelle laisse une traînée lumineuse qui brille pendant plusieurs secondes, et quelquefois pendant plus d'une minute : cette espèce de phosphorescence est rouge ou violacée sur la craie ; elle est verdâtre sur le sucre, sur certains spaths cristallisés et sur le grès de Fontainebleau.

Il ne faut pas des batteries très-fortes pour tuer des oiseaux, des lapins, et même des animaux de plus grande taille ; ils tombent subitement, et l'observation anatomique n'a pu découvrir jusqu'à ce jour quels organes sont blessés : cependant, par les convulsions qu'ils éprouvent quand le choc est trop faible pour les foudroyer, on peut juger que le système nerveux est violemment attaqué.

225. M. Knochenhauer a fait des recherches très-étendues sur les lois d'après lesquelles la décharge des batteries se distribue dans plusieurs conducteurs qui peuvent simultanément lui offrir passage, sur les quantités de chaleur qui sont développées dans ces conducteurs divers, et sur les effets d'induction qui se manifestent. Les résultats auxquels il est parvenu sont trop complexes, et sur quelques points peut-être trop contestables, pour que je puisse les résumer ici ; mais il m'a semblé utile d'indiquer quelques-uns des appareils dont il a fait usage.

Pour apprécier les quantités d'électricité qui constituent la charge d'une batterie, M. Knochenhauer en isole l'armature extérieure, et ne la fait communiquer au sol que par l'intermédiaire d'une bouteille de Leyde graduée (Fig. 18) ; il admet que la charge de la batterie est proportionnelle au nombre des décharges spontanées qui se sont produites dans la bouteille de Leyde ; ce qui suppose qu'entre deux décharges successives, il n'y ait aucune communication électrique entre le bouton de l'armature extérieure et celui de l'armature intérieure, et il est à craindre qu'il n'en soit pas ainsi, même dans l'air sec et sous la pression ordinaire.

Il emploie ensuite deux autres appareils, le *déchargeur* (Fig. 33), et le *tonomètre* (Fig. 34). Le premier se compose de deux colonnes isolantes, surmontées de deux boules de cuivre, portant l'une une tige *a*, l'autre une vis *b*, terminées l'une et l'autre par des sphères égales *c* et *d*, qui peuvent être mises à des distances variables par le mouvement de la vis : l'une est mise en communication avec l'armature extérieure, et l'autre avec l'armature intérieure de la batterie. Le second, le tonomètre, se compose pareillement de deux colonnes isolantes terminées par les supports de deux sphères égales *x* et *y*. La colonne qui porte la sphère *x* est portée sur un patin métallique qui se meut avec précision dans deux coulisses, au moyen de la vis *v*; on peut ainsi apprécier très-exactement la distance à laquelle se trouvent les deux sphères *x* et *y*.

Maintenant, pour étudier le passage du courant électrique, les expériences se disposent comme l'indiquent les figures 36, 37, 38. Sur ces figures, *c* et *d* représentent les sphères du déchargeur; *x* et *y*, celles du tonomètre; *ci* est le conducteur interposé entre *c* et l'armature intérieure *i* de la batterie; *ne* est le conducteur interposé entre *y* et l'armature extérieure *e*.

Dans la figure 36, on voit que le courant peut prendre un double chemin; il peut passer par le chemin continu *dmtne*, ou par le chemin interrompu *dmxyn*; alors on cherche, pour chaque distance des sphères *c* et *d*, quelle doit être la distance *xy*, pour que l'étincelle se manifeste en même temps dans le déchargeur entre *c* et *d*, et dans le tonomètre entre *x* et *y*; les distances relatives dépendent elles-mêmes des longueurs de fil interposées de *c* en *i*, de *n* en *e*, et de la longueur *mtn*.

Dans la figure 37, à partir du point *m* se présentent trois chemins, savoir, *mtn*, *mt'n*, et toujours le chemin interrompu *mxyn*.

Enfin, dans la figure 38, les conducteurs sont arrangés encore autrement : entre les points *t* et *p* il y a deux conducteurs continus, *pmt*, *prt*, auxquels on donne des longueurs ou des résistances relatives très-différentes, toujours en réglant la distance des sphères du tonomètre, pour que l'étincelle paraisse en même temps dans le tonomètre et dans le déchargeur.

La figure 35 représente l'espèce de thermomètre dont M. Knochenhauer s'est servi, pour apprécier la chaleur développée par le courant des batteries dans des circonstances don-

nées. C'est un cylindre de verre rempli d'air, dont la partie inférieure communique avec un tube thermométrique contenant de l'alcool, tandis que la partie supérieure est fermée par une plaque de métal, dans laquelle passent avec isolement deux conducteurs auxquels on attache un fil fin de platine, qui est échauffé par le courant; la température qu'il donne à l'air du réservoir cylindrique est accusée par le mouvement de la colonne d'alcool.

CHAPITRE V.

De la Lumière électrique et du Mouvement des corps électrisés.

226. Conditions générales pour que l'électricité donne de la lumière. — Les plus grandes charges électriques accumulées sur les corps, soit directement, soit par dissimulation, ne donnent jamais aucune apparence lumineuse quand l'équilibre est établi et que le fluide est en repos. Ainsi, la première condition de la lumière électrique est le mouvement des fluides ou la rupture de leur équilibre. Cette condition, toujours nécessaire, n'est pas toujours suffisante; il faut encore que la tension des fluides qui détermine leur mouvement soit une force assez considérable. Par exemple, l'électricité d'une machine ordinaire ne donne point de lumière sensible quand elle s'écoule dans le sol par un fil de métal; tandis qu'une machine puissante peut environner d'une auréole brillante un fil de fer de 15 ou 20 mètres de long, communiquant au sol aussi parfaitement qu'il soit possible (Van-Marum, *Description de la grande machine du musée de Teyler*). La tension nécessaire à la production de la lumière est tout à fait dépendante de l'état, de la forme et de la conductibilité du milieu dans lequel les fluides électriques doivent se mouvoir : quelquefois, de faibles tensions donnent une lumière éclatante; d'autres fois, les plus fortes tensions qu'on puisse accumuler ne donnent pas la moindre apparence lumineuse.

227. Lumière électrique dans l'air et dans les gaz sous la pression de l'atmosphère. — La distance à laquelle on peut tirer l'étincelle d'un corps électrisé dépend surtout de la conductibilité de sa substance, de l'étendue de sa surface et de l'épaisseur de la couche électrique dont il est chargé; car la seule condition pour que l'étincelle parte, est que la tension de l'électricité puisse vaincre la pression de l'air. Dans les corps à formes anguleuses, cette condition se trouve remplie, même pour des charges assez faibles, et le fluide se dissipe spontanément, en formant des *aigrettes* de lumière qui brillent dans les ténèbres, et dont les traits divergents présentent quelquefois plusieurs

centimètres de longueur. Dans les corps à formes arrondies, il faut de très-puissantes charges pour que l'étincelle parte d'elle-même; mais si on leur présente un conducteur communiquant au sol, il s'exerce à l'instant une action par influence; les fluides se déplacent en vertu de la conductibilité, s'accumulent en raison de l'étendue des surfaces, et l'étincelle jaillit dès que la pression de l'air est vaincue sur l'un ou l'autre des corps qui sont mis en présence. Une machine est très-forte quand elle peut, sans le secours des conducteurs secondaires, donner des étincelles à $\frac{3}{4}$ de mètre. A cette distance, la lumière électrique forme un sillon de feu dont les sinuosités sont tout à fait analogues aux zigzags de l'éclair.

Pour multiplier les étincelles que donne une machine, il suffit de multiplier les solutions de continuité du conducteur par lequel le fluide s'écoule dans le sol. C'est sur ce principe que reposent tous les jeux de la lumière électrique.

Avec des *grains* de métal enfilés dans de la soie et maintenus par des nœuds à quelques millimètres de distance, on peut composer des chaînes, des guirlandes ou des dessins, qui paraissent resplendissants de feu pendant tout le temps que l'on tourne la machine avec laquelle ils communiquent: entre le dernier grain et l'avant-dernier la lumière paraît au même instant qu'entre le premier et le second, tant est rapide la communication de l'électricité dans toute la longueur de la chaîne.

Les *tubes étincelants* (Pl. 17, Fig. 25) se composent avec de petits losanges de feuilles d'étain que l'on colle sur le verre en approchant leurs pointes à de très-petites distances l'une de l'autre; l'étincelle jaillit au même instant entre tous ces losanges, et le tube ou le matras paraît illuminé dans toute sa longueur.

Les *carreaux étincelants* offrent à l'œil des dessins plus fins et plus variés : on les forme en collant sur un carreau de verre ordinaire de petites bandes de feuilles d'étain (Pl. 17, Fig. 24), qui forment un ruban continu, depuis *a* jusqu'à *z*; ensuite, on enlève avec une pointe toutes les parties de ces bandes qui se trouvent sur les contours du dessin que l'on veut rendre visible. Chacune de ces solutions de continuité est marquée par une étincelle lorsqu'on fait passer le fluide de la machine de *z* en *a*, ou de *a* en *z*. On peut de cette manière représenter avec assez de vérité des figures de toute espèce : c'était le grand amusement des électriciens du siècle dernier.

Le *carreau magique* est autrement disposé : l'une de ses faces est recouverte d'une feuille d'étain et l'autre d'une espèce de vernis contenant beaucoup d'*aventurine* ou de parcelles de métal; l'électricité s'accumule par dissimulation; et, quand l'étincelle part, on voit sur la face aventurinée des traits de feu qui serpentent dans tous les sens.

C'est aussi dans l'obscurité qu'il faut étudier les phénomènes des pointes : alors, quand on les met en communication avec les conducteurs d'une forte machine, on aperçoit de brillantes aigrettes, comme celle qui est représentée (Pl. 17, Fig. 27); à l'extrémité de la pointe, on ne distingue qu'un seul trait de feu, qui se divise à une petite distance et se ramifie en une foule de petits filets étincelants.

L'électricité résineuse ne donne jamais des aigrettes aussi divergentes et aussi allongées que l'électricité vitrée; ce phénomène singulier est bien digne d'attention; puisqu'il semble offrir un caractère distinctif entre les deux fluides électriques.

Les pointes qui sont en communication avec le sol donnent aussi des aigrettes, même quand elles se trouvent à plusieurs mètres des conducteurs de la machine.

En tirant des étincelles un peu fortes sur un morceau de drap ou de soie couvert de poussière métallique ou frotté avec des feuilles minces d'or ou d'argent, on observe des effets analogues à ceux du carreau magique. La lumière paraît en mille endroits à la fois, et se ramifie dans tous les sens sur l'étendue de sa surface.

Des pointes de corps conducteurs encore plus fines et plus rapprochées donnent une espèce de *phosphorescence continue;* par exemple, les lames d'or très-minces, collées sur du verre, du cuir ou du bois, paraissent illuminées pendant tout le temps que l'électricité les traverse, et, sur certains corps mauvais conducteurs, la phosphorescence se prolonge pendant plusieurs minutes après le passage du fluide.

Ces apparences lumineuses que nous offre l'électricité des machines sont une imitation très-faible, et cependant très-exacte, de plusieurs phénomènes qu'on observe dans le ciel et sur la terre au moment des orages. Elles nous serviront de principes pour expliquer, dans la *Météréologie*, toutes les formes de la lumière électrique, telles que l'éclair, les langues de feu qui paraissent au sommet des mâts des vaisseaux ou sur les flèches des

tours élevées, et une foule d'autres météores qui étaient, pour les anciens, un sujet d'effroi et de superstition.

228. Lumière électrique dans le vide, dans les vapeurs et dans les gaz raréfiés. — Un tube de 2 mètres de longueur, dans lequel on a fait le vide, étant mis par l'une de ses extrémités en communication avec une machine ordinaire et par l'autre en communication avec le sol, on aperçoit tout son intérieur éclairé d'une vive lumière. L'électricité, ne trouvant plus qu'une faible résistance dans l'air qui reste, se dissipe au large dans toute la capacité du tube, et s'écoule en marquant partout son passage par des traits de feu. Quand les communications sont bien établies, la lumière paraît fixe et uniforme; mais si, à l'extérieur du tube, on approche un corps conducteur, elle se porte vers lui, et en même temps elle prend plus d'éclat. Il arrive presque toujours qu'un tube qui a servi à ces expériences donne encore des espèces d'éclairs longtemps après avoir été séparé de la machine.

Pour observer les diverses apparences de la lumière électrique suivant les différents degrés de raréfaction de l'air, on emploie l'appareil qui est représenté (Pl. 17, Fig. 26), c'est un vase de verre de forme ellipsoïde que l'on appelait autrefois l'*œuf philosophique* : à l'une de ses extrémités, il porte un tube à robinet, et à l'autre une tige à bouton passant dans une boîte à cuir. Quand le vide est fait aussi parfaitement qu'il soit possible, l'électricité passe librement en remplissant de lumière toute la capacité du vase; quand on laisse rentrer un peu d'air, la lumière devient moins diffuse; elle se resserre et forme entre les deux boutons *b* et *b'* des arcs de couleur pourpre; une quantité d'air un peu plus grande donne encore moins de diffusion à la lumière, et ainsi de suite jusqu'au moment où le fluide ne peut plus s'écouler qu'en jaillissant d'un bouton à l'autre sous forme d'étincelles.

Comme avec les meilleures machines nous ne pouvons faire le vide qu'à 1 ou 2 millimètres, il reste encore, dans les expériences précédentes, une quantité d'air qui peut avoir une grande influence et sur la formation de la lumière et sur sa couleur. Le vide barométrique étant le plus parfait que nous puissions obtenir, il est curieux de voir si le passage de l'électricité au travers des vapeurs si rares du mercure produirait encore des phénomènes lumineux. Dès l'an 1660, Picard avait remarqué qu'un

baromètre devient lumineux lorsqu'on l'agite dans les ténèbres: plus tard, on a constaté que ce phénomène est dû à l'électricité qui se développe par le frottement du mercure contre les parois intérieures du tube; enfin Cavendish imagina de faire un *double baromètre*, de manière que l'électricité donnée à l'une des cuvettes fût obligée de traverser le vide pour aller sortir par l'autre cuvette et s'écouler dans le sol (FIG. 28). Dans ce vide, plus parfait que les précédents, la matière électrique offre encore les mêmes phénomènes : elle remplit de lumière tout l'espace qu'elle traverse, et l'on reconnaît que des tensions même très-faibles sont suffisantes pour la faire passer du sommet de la première colonne au sommet de la seconde.

Les couleurs de la lumière électrique sont très-changeantes, et les changements qu'elle présente sont dépendants de la force de l'étincelle et de la pression du gaz qu'elle traverse; cependant, pour la même force et la même pression, il y a des gaz et des vapeurs qui semblent donner de préférence les teintes rougeâtres, tandis que d'autres donnent les teintes jaunes, bleues ou violacées.

229. Causes de la lumière électrique. — Quelques auteurs ont pensé que le fluide électrique, en s'ouvrant de force un passage au travers des corps, les comprimait au point de les rendre lumineux; ainsi, d'après cette hypothèse, les vapeurs de mercure dans le vide barométrique seraient elles-mêmes comprimées et refoulées avec tant de violence qu'elles dégageraient de la chaleur et de la lumière. Il n'y a point de faits positifs pour démontrer la fausseté de cette opinion, ni même son insuffisance.

Cependant il y a une autre supposition qui est aujourd'hui plus généralement admise, et qui nous semble plus vraisemblable; elle paraît avoir été faite pour la première fois par Ritter, et elle a été depuis développée par un grand nombre de savants, surtout par Davy, OErsted et Berzélius. Elle consiste à regarder tous les atomes de la matière pondérable comme les éléments entre lesquels s'accomplissent toutes les décompositions et toutes les recompositions électriques. Les atomes posséderaient primitivement l'un des fluides : les uns, que l'on appelle *électro-positifs*, posséderaient primitivement le fluide positif ou vitré ; les autres, que l'on appelle *électro-négatifs*, posséderaient primitivement le fluide négatif ou résineux :

les premiers, enveloppés de fluide neutre, auraient attiré du fluide négatif, tandis que les derniers, au contraire, auraient attiré du fluide positif; de telle sorte qu'ils seraient l'un et l'autre à l'état naturel. Cela posé, imaginons une seule file d'atomes électro-positifs ou électro-négatifs, et l'un des fluides qui se présente pour la parcourir, il est évident qu'il se manifestera subitement autant de petites étincelles qu'il y a d'atomes, à peu près comme il arrive à la chaîne des grains de métal dont nous avons parlé; pour plusieurs files d'atomes le phénomène serait le même, et dans le vide du double baromètre, les atomes dispersés de la vapeur de mercure seraient la vraie cause de la lumière qu'on observe, enfin, dans le vide absolu, on ne sait ce qui arriverait, car le fluide neutre, s'il existe dans le vide, étant homogène et sans solutions de continuité, on ne peut rien dire des effets qu'il éprouverait, puisqu'on ne sait rien sur le mode d'agrégation des deux fluides qui le constituent.

Bien que cette hypothèse semble appuyée par tous les faits connus, il est bon cependant de la mettre à de nouvelles épreuves, et de la regarder plutôt comme un moyen de chercher la vérité que comme la vérité elle-même.

230. Cause du mouvement des corps non conducteurs électrisés. — Il ne paraît pas qu'il existe aucune attraction à distance, ni même aucune affinité entre le fluide électrique et la substance des corps non conducteurs, car tous ces corps perdent leur électricité dans le vide. D'après cela, si nous considérons deux balles de gomme laque, par exemple, chargées l'une et l'autre d'une même électricité et mises en présence, la seule force qui les sollicite est la répulsion de toutes les molécules du fluide dont elles sont revêtues; l'effet immédiat de cette force serait donc d'écarter ces molécules, et de les disperser de toutes parts, si elles pouvaient se mouvoir librement : par exemple, si les deux balles étaient dans le vide, elles resteraient immobiles, tandis que leur électricité, obéissant à sa répulsion propre, se disséminerait jusqu'aux limites de l'espace; mais, suspendues au milieu de l'air qui est mauvais conducteur, le fluide qui les couvre est arrêté dans tous les sens, ou plutôt il trouve une résistance à vaincre. Celles de ces molécules qui s'appuient sur l'air ne peuvent se mouvoir sans pousser l'air devant elles, et celles qui s'appuient sur la substance des balles de gomme laque ne peuvent se mouvoir non plus sans les pousser

comme un obstacle qui s'oppose à leur marche. C'est par ce double effet que les balles sont mises en mouvement et écartées l'une de l'autre.

Pour rendre le phénomène plus sensible, on pourrait concevoir que les balles de gomme laque, après avoir été électrisées, ont eu leur surface recouverte d'une couche de substance imperméable à l'électricité, de telle sorte que le fluide qui les charge soit comme emprisonné entre ces deux matières non conductrices. Alors il est évident que toutes les actions répulsives qui s'exercent entre les molécules électriques se transmettent immédiatement aux molécules pondérables par le fait seul de la résistance passive qu'elles opposent. La couche d'air qui enveloppe les corps fait précisément l'office de cette couche imperméable à l'électricité.

On prouve, de la même manière, que des balles chargées de fluides contraires doivent être entraînées et attirées par l'effort que font les molécules de ces fluides pour se rejoindre.

Le même raisonnement s'applique à tous les corps non conducteurs, quelle que soit leur forme; et il est visible que si un corps non conducteur, pris dans son état naturel, n'est jamais attiré ni repoussé par un corps électrisé, c'est simplement parce que, ses fluides n'étant point décomposés par influence et séparés l'un de l'autre, il éprouve toujours deux actions contraires, l'une attractive, et l'autre répulsive, qui sont sans cesse égales et qui se détruisent.

231. Mouvement des corps conducteurs électrisés. — Nous avons déjà vu que, dans son état d'équilibre sur un corps conducteur, l'électricité forme une couche d'une certaine épaisseur, ayant deux surfaces, l'une qui s'appuie sur l'air environnant, et l'autre qui est libre dans la substance même du corps. Les molécules de la surface libre ne peuvent jamais à elles seules imprimer aucun mouvement à la matière pondérable, puisqu'elles ont la facilité de se déplacer dans toute la masse sans y éprouver aucune résistance sensible. Tous les mouvements des corps conducteurs électrisés sont donc le résultat des diverses pressions que le fluide exerce contre l'air, ou, en général, contre les enveloppes imperméables qui limitent leurs surfaces; car on peut toujours assimiler l'air qui touche un corps conducteur à une enveloppe imperméable qui ferait corps avec lui. Cela posé, si l'on imagine des sphères conductrices, il est visible que, chargées

d'une même électricité, elles se repoussent, surtout par les régions de leurs surfaces les plus éloignées l'une de l'autre ; tandis que, chargées d'électricités contraires, elles s'attirent, surtout par les régions les plus voisines; et ce n'est pas toutefois que les molécules de la surface libre n'aient aucune part au phénomène, car elles sont maintenues au lieu qu'elles occupent par des forces ou des répulsions contraires qui prennent leur appui contre la couche d'air environnante.

Un corps conducteur, à l'état naturel, est toujours attiré par un corps électrisé, parce que ses fluides étant séparés par influence, et celui de nom contraire étant toujours appelé dans la région la plus voisine, l'attraction qui s'exerce sur lui est toujours plus efficace que la répulsion qui s'exerce sur l'autre à une distance plus grande.

232. **Mouvements produits par l'écoulement de l'électricité.** — Sur un pivot conducteur *cp*, communiquant à la machine (Pl. 17, Fig. 35), on pose en équilibre une petite tige de métal *tt'*, dont les deux bouts sont aiguisés et recourbés en sens contraire, et, dès qu'on tourne la machine, cet appareil, que l'on appelle le *tourniquet électrique*, prend un mouvement de rotation très-rapide, comme si les extrémités des pointes étaient vivement repoussées. Le même phénomène se produit sur les tourniquets à plusieurs tiges, et lorsqu'on est dans les ténèbres on observe, pendant le mouvement, des aigrettes de feu qui s'élancent de chaque pointe. L'électricité résineuse et la vitrée présentent une différence à l'égard de la lumière, mais elles n'en présentent aucune à l'égard du mouvement. Cette rotation curieuse s'explique de la manière suivante :

Le fluide électrique, répandu partout sur la surface des tiges du tourniquet, exerce partout une pression sur l'air environnant, comme l'eau et les autres fluides pondérables pressent, dans tous les points, les parois des vases qui les contiennent. Si le fluide électrique ne trouvait point d'issue, les pressions opposées seraient toujours égales, et l'appareil resterait au repos : mais, dès qu'il s'écoule par une pointe, il n'exerce plus de pression sur l'orifice de l'écoulement, et la pression intérieure qui s'exerce au point opposé détermine le mouvement par un véritable *recul*, tout à fait pareil à celui qui s'exerce dans le tourniquet à gaz ou dans le tourniquet hydraulique.

233. **Mouvements produits par une décomposition instan-**

tanée. — Concevons une sphère conductrice, de cuivre par exemple, communiquant au sol par un fil très-fin, et posée sur un plan non conducteur indéfini, où elle n'est retenue que par son poids; imaginons qu'au-dessus d'elle, à une certaine distance, on dispose un corps capable de recevoir ou de conserver les plus fortes charges électriques. Il est évident que, si la sphère est très-petite, elle sera emportée par l'attraction qu'elle éprouve, et viendra de bas en haut, malgré son poids, se précipiter sur le corps qui la sollicite par influence. Mais il est évident aussi que, son diamètre et son poids augmentant, il arrivera une certaine limite où la puissance électrique sera tout à fait insuffisante pour la soulever : l'étincelle partira entre elle et le corps électrisé qui la sollicite sans qu'elle en reçoive le moindre mouvement, à peu près comme l'étincelle part des conducteurs de la machine sans qu'ils soient entraînés et arrachés de leurs supports.

Cependant, on observe des effets de la foudre qui semblent contraires à ce principe : on a vu souvent de grandes masses transportées à plusieurs centaines de pas, et surtout des pièces de métal arrachées de leurs scellements par un effort équivalant à plusieurs milliers de kilogrammes. Ces phénomènes me paraissent dépendre d'une différence dans la décomposition des fluides naturels par des actions lentes, ou par des actions subites. Dans le premier cas, la conductibilité suffit au déplacement des fluides, et ils ont le temps de se transporter et de s'arranger à la surface, où ils exercent contre l'air une pression qui est bientôt capable de le repousser; dans le second cas, tous les atomes de la masse éprouvent, simultanément et subitement, une décomposition de leurs fluides naturels; ils sont saisis avec tant de violence, que l'arrangement voulu par les lois de l'équilibre n'a pas le temps de s'accomplir, et les masses sont ainsi entraînées par des forces incomparablement plus grandes que celles qui pourraient trouver leur point d'appui contre l'air.

CHAPITRE VI.

Électricité développée par la pression et par la chaleur.

234. Nous avons vu que deux surfaces quelconques s'électrisent par le frottement, l'une prenant le fluide vitré et l'autre le résineux ; nous avons vu pareillement que la tension de l'électricité qui se développe dans ces circonstances dépend de la nature des corps, de l'état de leur surface, et de leur température. Mais cette cause mécanique n'est pas la seule qui puisse décomposer ou séparer les fluides : sous certaines conditions, les changements de pression et de température peuvent aussi développer de l'électricité.

235. Développement de l'électricité par pression.— On pose un disque de métal sur un taffetas gommé ; on le relève ensuite au moyen d'un manche isolant, après l'avoir un peu pressé, et l'on trouve de l'électricité résineuse sur ce disque, et de la vitrée sur le taffetas. Cette expérience que l'on doit à Libes, n'offre pas un caractère décisif : l'adhérence qui s'établit entre la surface du métal et la surface visqueuse du vernis produit un effet assez analogue au frottement. Mais Haüy est parvenu à développer de l'électricité dans un grand nombre de corps à surfaces lisses et polies, et dans de telles circonstances que le phénomène est bien certainement dû à la pression et non pas au frottement. Par exemple, un fragment de spath calcaire, à faces parallèles, étant pressé pendant un instant entre les doigts, acquiert une charge très-sensible d'électricité vitrée ; il en est de même de la topaze, de la chaux fluatée, du mica, de l'arragonite, du quartz, et de plusieurs autres substances : toutefois l'espèce d'électricité qu'elles prennent dépend de la nature du corps qui les presse. Haüy a découvert en même temps une propriété très-curieuse des cristaux électriques par pression : c'est la faculté qu'ils ont de conserver leur électricité pendant plusieurs heures, et quelquefois même pendant plusieurs jours. La chaux carbonatée est, sous ce rapport, la substance la plus remarquable : elle possède une

telle *force conservatrice*, qu'après avoir été pressée un instant, elle donne encore, au bout de *onze* jours, des signes électriques sensibles (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. V). C'est sur cette propriété que repose la construction de l'aiguille électrique de Haüy, représentée (Pl. 17, Fig. 36); elle ressemble à l'aiguille ordinaire, avec cette seule différence, qu'à l'une des extrémités, au lieu d'un petit globule de métal, se trouve adaptée une petite lame de chaux carbonatée cc', que l'on électrise en la pressant entre les doigts; cet électroscope, conservant très-bien sa force primitive, est un des plus simples et des plus commodes pour comparer approximativement les tensions électriques des différents corps qu'on lui présente. Ainsi, la faculté de développer de l'électricité par une pression donnée, celle de prendre tel ou tel fluide, et celle de le conserver plus ou moins longtemps, sont autant de caractères qui peuvent servir à distinguer et à classer les cristaux.

236. Des électricités produites par la chaleur. — La tourmaline a la propriété d'attirer et de repousser les corps légers : dans les Indes, et surtout à Ceylan, où cette pierre est très-commune, on s'amuse de cette propriété depuis bien des siècles, à peu près comme au temps de Platon les Grecs s'amusaient des attractions de l'aimant. Un phénomène aussi curieux ne pouvait échapper à l'attention des voyageurs ou même des commerçants. Les Hollandais firent connaître les tourmalines en Europe, et, depuis une centaine d'années, les propriétés électriques dont elles jouissent exercent la sagacité des physiciens. Voici les résultats généraux qui ont été découverts et constatés par Canton, Wilson, Priestley, Bergmann, Æpinus et Haüy :

1° Quand une tourmaline est électrique, elle présente toujours vers les extrémités de son axe deux *pôles contraires*, l'un agissant par du fluide vitré, et l'autre par du fluide résineux : sa région moyenne ne donne aucun signe d'électricité. Les fluides électriques qui se développent dans la tourmaline sont donc distribués à peu près comme les fluides magnétiques, qui deviennent libres dans un aimant cylindrique ou prismatique.

2° Une tourmaline étant brisée transversalement pendant qu'elle est électrique, chacun de ses fragments offre deux pôles, disposés dans le même sens que les pôles primitifs; autre analogie remarquable entre le fluide électrique des tourmalines et le fluide magnétique des aimants.

Il était nécessaire d'énoncer ces deux lois générales de la distribution des fluides dans les tourmalines, pour comprendre les conditions du développement de l'électricité et les singularités qu'elles présentent.

3° Pour chaque tourmaline, il y a deux limites de température entre lesquelles sont compris tous les phénomènes électriques; au-dessus de la limite supérieure et au-dessous de la limite inférieure, la tourmaline se comporte comme les autres corps, et ne manifeste plus d'*électricité polaire*. Ces limites paraissent être souvent 10° et 150°; elles sont en général peu différentes pour les tourmalines de même dimension, mais elles varient avec la longueur.

4° Entre ces limites, quand on chauffe une tourmaline régulièrement, c'est-à-dire de manière qu'elle éprouve à peu près les mêmes accroissements de chaleur sur tous les points de sa surface, ses pôles électriques commencent à paraître, le vitré à un bout, le résineux à l'autre, et ils restent ainsi durant tout le temps que la température *change* et *s'élève*.

5° Une tourmaline ayant ses pôles par échauffement, si on la refroidit régulièrement, ses pôles disparaissent un instant pour reparaître ensuite; mais, en changeant de position, le vitré prenant la place du résineux et *vice versa*, et ces pôles, par *refroidissement*, inverses des premiers, se maintiennent pendant tout le temps que la température *change* et *s'abaisse*.

6° La vertu polaire semble dépendre du *changement* de température, de telle sorte qu'à une température donnée, une tourmaline peut se présenter dans trois états différents, savoir : à l'état naturel, si elle a été maintenue longtemps à cette température; avec ses pôles par échauffement, si elle y arrive en s'échauffant; avec ses pôles par refroidissement, si elle y arrive en se refroidissant.

7° Haüy a quelquefois remarqué un renversement des pôles pendant l'élévation de température, et un renversement contraire pendant le refroidissement : ce phénomène, qui ne se produit pas toujours, pourrait dépendre d'une différence de température entre les couches de la surface et les couches centrales.

8° Une tourmaline, chauffée ou refroidie par une de ses extrémités seulement, paraît, pendant quelques instants, ne posséder qu'une seule électricité dans toute sa longueur; mais, comme on voit toujours les deux électricités se développer en même temps

dans tous les autres phénomènes électriques, quels qu'ils soient, il est naturel de supposer que dans ce cas, exceptionnel en apparence, les deux fluides s'y trouvent encore, inégalement distribués dans la longueur ou dans l'épaisseur de la tourmaline, et par conséquent inégalement perceptibles.

Pour vérifier toutes ces lois de l'électricité de la tourmaline, quelques observateurs, comme Priestley, la faisaient chauffer et refroidir pendant qu'elle était suspendue à un fil, et Haüy la posait sur un petit appareil représenté (Pl. 17, Fig. 34).

Il existe un grand nombre de cristaux qui offrent des propriétés électriques analogues à celles de la tourmaline.

TROISIÈME SECTION.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

Galvanisme et Pile de Volta.

237. Découverte du galvanisme. — En 1789, Galvani, médecin et professeur à Bologne, observa un phénomène singulier : ayant eu l'occasion de préparer des grenouilles pour divers sujets de recherches, il les suspendit par hasard à un balcon de fer par de petits crochets de cuivre qui passaient entre les nerfs lombaires et la colonne dorsale ; disposées ainsi, ces grenouilles, mortes et mutilées, éprouvaient de vives convulsions. Un observateur vulgaire aurait pu remarquer le fait, mais il en aurait facilement imaginé quelque explication spécieuse, et son esprit satisfait se serait occupé d'autre chose. Galvani fut moins prompt dans ses jugements : doué d'une attention pénétrante et d'une rare sagacité, il saisit dans ce phénomène un principe nouveau, et en fit sortir cette branche féconde de la physique qui est maintenant connue sous le nom de *Galvanisme*. Il reconnut d'abord que les grenouilles, coupées, dépouillées et suspendues, comme nous l'avons dit, n'éprouvent pas de convulsions permanentes : pour que leurs membres s'agitent, il faut que le vent, ou quelque autre cause accidentelle, vienne mettre leurs muscles en contact avec la tige de fer qui porte le crochet de cuivre. Cette condition est indispensable, et l'on peut s'en assurer par l'expérience : pour cela, on coupe une grenouille vivante, on la dépouille rapidement, et, passant la pointe des ciseaux sous les deux nerfs lombaires qui paraissent comme des fils blancs de chaque côté de la colonne vertébrale, on enlève, en deux coups, les deux ou trois vertèbres inférieures ; ainsi, les nerfs lombaires sont mis à nu, et forment la seule attache qui lie encore les membres inférieurs aux vertèbres supérieures ; un

fil de cuivre, qui passe entre les deux nerfs et qui les touche, va s'accrocher à un fil de fer recourbé et assez long pour venir toucher les jointures ou les muscles. A chaque contact, les jambes se replient et s'agitent, et cette moitié de grenouille morte semble reprendre vie pour sauter. Ces effets peuvent se reproduire encore au bout de quelques heures ; mais le plus souvent les convulsions s'affaiblissent assez promptement, et après 20 ou 30 minutes, on n'observe plus que de légères palpitations dans la fibre des muscles.

Voilà donc un fait régulier, constant et bien caractérisé, dont on connaît les conditions, et qui peut se reproduire à volonté. C'est en établissant ce point fondamental que Galvani a ouvert une nouvelle carrière, et distingué les commotions dont il s'agit de ces mouvements vagues et convulsifs que l'on observe souvent dans les insectes, les reptiles et les poissons, longtemps après les diverses mutilations qu'on leur a fait subir. Préoccupé de quelque système sur un fluide nerveux ou sur un fluide vital, Galvani ne tarda pas à imaginer une explication du phénomène, qui fut en rapport avec ses idées du moment. Les commotions de la grenouille, dit-il, sont excitées par un fluide qui passe des nerfs aux muscles, au moyen de la communication extérieure que l'on établit entre eux ; ce fluide existe dans les nerfs, il traverse l'arc conducteur, c'est-à-dire le crochet de cuivre et la tige de fer, et vient à l'instant du contact se précipiter sur les muscles, et les contracter à peu près comme ferait une décharge électrique.

Ce fluide nouveau fut appelé *fluide galvanique*, et les corps organisés furent considérés, par rapport à ce fluide, comme une espèce de bouteille de Leyde dont les muscles et les nerfs étaient les deux armatures.

Le bruit de cette découverte se répandit bientôt en Allemagne, en France et en Angleterre ; partout on s'empressait de répéter, de varier les expériences. Le phénomène lui-même excitait une grande admiration ; mais l'espérance de saisir, dans les corps animés, un fluide subtil, un principe de vie, donnait encore une nouvelle ardeur à l'active curiosité des savants. D'ailleurs, ces idées paraissaient à une époque de grandes découvertes et de grandes réformes ; tous les esprits étaient en mouvement et comme emportés par l'attrait de la nouveauté.

On reconnut bientôt une analogie remarquable entre le fluide

galvanique et le fluide électrique : c'est qu'on n'obtient jamais de commotions dans les grenouilles lorsqu'on établit la communication entre les nerfs et les muscles au moyen des corps mauvais conducteurs de l'électricité. En même temps, le phénomène prit une vaste extension, car on découvrit qu'il se manifestait dans la plupart des corps vivants. Souvent même il n'est pas nécessaire de dénuder ni les muscles ni les nerfs pour obtenir un effet très-marqué. Ainsi, une pièce de cuivre étant posée sur la langue et une pièce de fer dessous, on éprouve une contraction et une saveur acide ou alcaline à l'instant où les deux pièces se touchent; il se trouve même des personnes assez sensibles pour apercevoir alors une lueur qui passe devant les yeux.

Toute hypothèse est bonne quand elle fait faire des découvertes, et l'hypothèse de Galvani eut son moment de succès : mais, pour la rendre féconde, il fallait admettre des considérations vagues, des données incertaines; il fallait se jeter dans des questions compliquées sur les fonctions vitales et sur les mystères de l'organisation. Ces questions, sans cesse agitées parmi les hommes, et toujours insolubles, commençaient à reprendre vogue; les meilleurs esprits s'y laissaient entraîner; et l'on ne sait combien de fausses routes auraient été ouvertes à l'esprit humain, ni avec quelle ardeur on s'y serait jeté, si un homme de génie hardi n'eût mis un terme à toutes ces vaines tentatives. Cet homme fut Volta. Déjà célèbre par plusieurs découvertes ingénieuses sur l'électricité, Volta, professeur à Pavie, répétait, avec une inquiète attention, toutes les expériences de Galvani et de ses disciples : plein d'enthousiasme pour les faits, il ne donnait qu'une adhésion conditionnelle aux hypothèses; enfin il saisit, avec une admirable sagacité, une condition du phénomène dont l'importance avait échappé jusque-là aux plus habiles observateurs. Quand l'arc conducteur, qui établit la communication entre les muscles et les nerfs, est d'un seul métal, la contraction est toujours peu sensible : au contraire, elle est toujours vive et forte quand l'arc conducteur est composé de deux métaux. L'expérience en est représentée dans la figure 1 (Pl. 23) : la partie *z* de l'arc est de zinc, et l'autre *c* est de cuivre; il importe que les métaux soient nets et bien décapés au point où ils touchent la grenouille, et aussi au point où ils se touchent entre eux. Cette condition posée, Volta en tire la conséquence suivante : Il est vrai, dit-il, qu'il y a du fluide en jeu dans cette expérience; mais la grenouille

n'est pas une bouteille de Leyde; le fluide qui l'agite n'est point dans ses muscles ni dans ses nerfs, il est dans les métaux; il se développe par leur contact, et il n'est autre chose que du fluide électrique ordinaire. Une idée aussi contraire à tout ce que l'on connaissait alors sur les propriétés électriques et sur la conductibilité des métaux, ne pouvait être admise sans opposition; il est vrai que l'hypothèse de Galvani était épuisée; elle ne produisait plus de faits nouveaux, mais elle avait l'avantage d'expliquer tous les faits connus, et d'établir entre eux une liaison séduisante. Les opinions furent partagées. A quoi servent les deux métaux, disaient les partisans de Galvani, si ce n'est à établir une communication plus complète entre les muscles et les nerfs, et à donner au fluide un écoulement plus libre? A quoi pourraient-ils servir, répondaient les partisans de Volta, s'il n'y avait qu'une communication à établir; un seul métal ne serait-il pas suffisant? Et, de part et d'autre, on tentait des expériences nouvelles, autant peut-être pour soutenir l'opinion qu'on avait adoptée que pour la mettre à l'épreuve : car il y a aussi dans les discussions scientifiques une sorte de conviction prématurée, à laquelle on se laisse trop souvent entraîner. Galvani, sans nier l'efficacité des deux métaux, essayait de démontrer qu'un seul métal excite des contractions : et, en effet, une grenouille préparée et jetée sur un bain de mercure, éprouve des palpitations très-sensibles; elle en éprouve pareillement lorsqu'on touche à la fois les muscles et les nerfs avec du plomb très-pur, ou avec un autre métal dans lequel l'analyse chimique ne découvre rien d'étranger. Loin de contester ces phénomènes, Volta les annonçait lui-même, et il en tirait des preuves à l'appui de son opinion. Il est vrai qu'un seul métal agit; mais frottez-en l'extrémité sur un autre métal, il agira encore avec plus d'énergie. Les parcelles imperceptibles qui s'y attachent lui donnent une hétérogénéité suffisante; c'est au contact du métal et de ces parcelles étrangères que l'électricité se développe. Ce qui est homogène pour l'analyse chimique n'est point homogène absolument, et, d'ailleurs, si l'art ou la nature pouvaient nous donner un métal d'une pureté parfaite, ce métal agirait encore : dès qu'il touche les muscles ou les nerfs, il y a hétérogénéité aux points de contact, et par conséquent de l'électricité produite. Enfin, la substance des muscles et celle des nerfs sont assez différentes entre elles pour donner de l'électricité quand elles se touchent; et, en effet, en repliant

les muscles cruraux sur les nerfs lombaires, on obtient des palpitations sensibles, surtout si la grenouille est très-vive et très-rapidement préparée.

238. Expériences de Volta. — Force électromotrice. — Construction de la pile, et ses caractères déterminés par l'expérience. — L'idée du développement de l'électricité au contact des corps hétérogènes ne s'accréditait que lentement, la sévérité des théories physiques en réclamait des preuves encore plus directes et plus décisives, et Volta essaya de les produire, au moyen du condensateur qu'il avait inventé quelques années auparavant, et que nous avons décrit n° **223** (Pl. 18, Fig. 6).

L'expérience se fait de la manière suivante : après s'être assuré que le condensateur garde bien le fluide qu'on lui donne, et après l'avoir remis à l'état naturel, on établit, avec les doigts mouillés, une communication entre son plateau supérieur et le sol; en même temps une plaque de zinc, tenue pareillement avec les doigts mouillés, est mise en contact avec le plateau inférieur; un seul instant suffit, on rompt les communications, on enlève le disque supérieur, et l'on observe une divergence sensible dans les lames d'or. D'où vient cette électricité? Volta pensait qu'elle n'avait pu être développée qu'au contact du cuivre avec la lame de zinc; négligeant complétement l'action chimique qui peut s'exercer et qui s'exerce en effet au contact du zinc et du liquide qui mouille les doigts. Volta regardait cette expérience comme une preuve incontestable qu'il y a entre le cuivre et le zinc, lorsqu'ils se touchent, une *force électromotrice* capable de développer de l'électricité vitrée sur le zinc, et résineuse sur le cuivre, car, dans l'expérience dont il s'agit, le plateau du condensateur qui touche le zinc se charge de l'électricité résineuse.

Cette expérience a été variée de mille manières; tous les corps conducteurs ont été successivement mis en contact avec l'un des plateaux du condensateur de cuivre; plusieurs physiciens ont même fait construire des condensateurs d'or, ou de platine, pour éviter avec plus de soin les actions chimiques; et, suivant les conditions dans lesquelles on se place, on obtient ou l'on n'obtient pas d'électricité. En général, en procédant comme nous l'avons dit d'abord, on obtient une charge au condensateur, quand le métal qui touche au plateau inférieur, ou quand le plateau supérieur lui-même, que l'on touche avec le doigt mouillé, sont des corps facilement oxydables; mais, en général

aussi, le condensateur ne prend aucune charge sensible quand le corps que l'on soumet à l'épreuve n'est aucunement altérable, les plateaux eux-mêmes étant d'or ou de platine. L'on n'obtient non plus aucune charge, lorsqu'en prenant une lame moitié zinc et moitié cuivre (Pl. 23, Fig. 2), on la tient à la main par la portion cuivre, pour mettre son zinc en contact avec le plateau inférieur. Dans ce cas, les physiciens qui nient l'existence de la force électromotrice, et qui expliquent ces phénomènes par l'action chimique, se bornent à dire qu'il n'y a pas d'électricité parce qu'il n'y a pas d'action chimique, tandis que Volta et les partisans de la force électromotrice disent que le zinc étant entre deux cuivres, il y a deux forces électromotrices dont les effets se balancent : la première, qui s'exerce entre le zinc et le plateau, tend bien à charger celui-ci d'électricité résineuse, mais en même temps elle charge le zinc d'une égale quantité d'électricité vitrée ; la seconde, qui s'exerce entre le zinc et le cuivre de la double plaque, tend pareillement à charger le zinc d'électricité vitrée ; ainsi le plateau ne peut prendre qu'une quantité d'électricité résineuse égale à la moitié de l'électricité vitrée qui s'accumule sur le zinc, et il faudrait que la surface du zinc fût extrêmement grande pour que le condensateur pût se charger.

Il y a donc de l'incertitude sur la véritable origine de l'électricité qui se manifeste dans les expériences dont il s'agit. Pendant plus de trente ans les physiciens ont admis, presque sans contestation, que, conformément aux idées de Volta, cette électricité était due à l'action d'une force électromotrice ; mais depuis la découverte de l'électro-magnétisme, qui a donné d'autres moyens d'étudier le développement de l'électricité, et surtout depuis quelques années, une foule d'expériences nouvelles démontrent d'une manière incontestable, non-seulement que l'action chimique développe toujours les deux électricités, mais que la plupart des phénomènes qui avaient été expliqués par la force électromotrice doivent l'être essentiellement par les actions chimiques. En attendant que nous puissions aborder cette discussion, comme nous le ferons plus loin (*Électro-chimie*, chap. VII), nous devons nous borner à accepter simplement les résultats des expériences, conformément aux vrais principes de la méthode expérimentale, qui consiste à bien établir les faits et leurs conséquences, avant de chercher les explications et les causes premières.

Nous admettrons donc comme un fait fondamental découvert par Volta, que certains métaux, et surtout les métaux oxydables, dégagent de l'électricité, et chargent le condensateur, lorsqu'ils sont placés dans les conditions dont nous avons parlé.

A ce premier fait, Volta en a ajouté un second bien plus fécond encore et bien plus important. Il est vrai que, dans son esprit, il était une conséquence nécessaire du premier; mais nous laissons de côté pour un moment la liaison qu'ils peuvent avoir, afin de rester strictement dans les limites des données expérimentales. Voici ce second fait : sur une plaque de verre on pose un *disque de cuivre* (Pl. 23, Fig. 3), sur celui-ci un *disque de zinc*, et sur le zinc une *rondelle humide;* puis sur cette première rondelle humide on continue à poser dans le même ordre, cuivre, zinc, rondelle humide; et l'on continue ainsi, toujours dans le même ordre. Alors on a un appareil, une *pile de Volta*, qui présente les caractères suivants : 1° si, après avoir touché le premier cuivre, pour le mettre en contact avec le sol, on vient présenter au sommet de la pile le condensateur à taffetas (Pl. 18, Fig. 5), dès qu'il touche le sommet, il prend une forte charge d'électricité vitrée; 2° si l'on procède en sens inverse, c'est-à-dire, si, en mettant le sommet de la pile en contact avec le sol, on vient en toucher la base avec le condensateur, l'on y prend une forte charge d'électricité résineuse. Et ces expériences peuvent se répéter et se renouveler indéfiniment, même quand il y a plusieurs heures que la pile est montée, pourvu que les rondelles ne soient pas desséchées; 3° les effets électriques que l'on obtient sont d'autant plus intenses que l'on accumule un plus grand nombre d'éléments.

La rondelle humide est un disque de papier, ou de carton, ou de drap, etc., humecté avec de l'eau dans laquelle on a fait dissoudre un sel, ou que l'on a aiguisée avec un $\frac{1}{60}$ ou $\frac{1}{100}$ d'acide sulfurique, ou azotique, ou hydrochlorique, etc.

Les deux disques de zinc et de cuivre qui se touchent peuvent être soudés ensemble; ils forment ce qu'on appelle *une paire*, ou *un couple*, ou *un élément* de la pile.

Au lieu de zinc et de cuivre on peut employer pour faire un élément des métaux quelconques, pourvu que l'un d'eux soit attaqué chimiquement par le liquide qui humecte la rondelle; mais il ne faudrait pas qu'ils le fussent tous deux également.

Celle des extrémités de la pile qui charge le condensateur

d'électricité vitrée, s'appelle le *pôle positif* de la pile, et celle qui le charge d'électricité résineuse s'appelle le *pôle négatif*. Lorsque ces extrémités ont été mises en communication avec des fils ou conducteurs d'une longueur quelconque, ces conducteurs prennent eux-mêmes le nom de *pôles*. Telles sont les conditions générales d'après lesquelles se construit la pile inventée par Volta, tels sont les caractères qu'elle présente. On peut contester aujourd'hui l'exacte justesse des idées théoriques par lesquelles le génie de Volta s'est laissé conduire, mais personne assurément ne peut contester que cette invention ne soit l'une des plus admirables et des plus fécondes dont la science se soit enrichie.

239. Effets de la pile. — La pile dont nous venons d'indiquer la construction s'appelle *pile à colonne*. Pour observer les divers effets qu'elle peut produire, on lui donne, en général, la disposition qui est représentée (Pl. 23, Fig. 4); les disques sont maintenus entre trois tubes de verre, qui s'élèvent de la base et qui supportent la pièce supérieure.

Puisque l'un des pôles est toujours chargé d'électricité vitrée, et l'autre d'électricité résineuse, il en résulte qu'en mettant les conducteurs ou les pôles en présence, on doit, si la pile est assez forte, obtenir une étincelle, et on l'obtient en effet, quand il y a par exemple 20 ou 30 éléments dans la pile. Puisque l'action de la pile se maintient et se continue pendant des heures entières, il en résulte que pendant des heures entières l'on doit avoir une étincelle entre les pôles ; c'est aussi ce que l'expérience confirme. La pile de Volta est donc une véritable bouteille de Leyde, ou plutôt une véritable batterie qui se *recharge d'elle-même*, et qui ne s'épuise qu'après un temps très-long, au lieu de s'épuiser après chaque décharge comme une batterie ordinaire ; ainsi elle doit produire, dans une autre mesure et avec une autre intensité dépendant de la permanence de son action, tous les effets divers que produisent les bouteilles de Leyde et les batteries, c'est-à-dire, des *effets physiologiques*, des *effets physiques* et des *effets chimiques*.

Les *effets physiologiques* de la pile à colonne sont très-remarquables : lorsqu'on prend de chaque main un cylindre métallique un peu mouillé d'eau acidulée, et qu'après avoir touché la base de la pile avec un de ces cylindres, l'on vient avec l'autre toucher le sommet, ou même un point quelconque de la hauteur,

on reçoit une commotion plus ou moins vive, et qui se répète sans cesse lorsqu'on maintient le contact.

Les *effets physiques* sont moins marqués : ainsi, lorsqu'on réunit les pôles par un fil de fer ou de platine très-fin et très-court, on s'aperçoit qu'il s'échauffe, et qu'il reste chaud tant que les communications sont établies ; mais il faut des éléments larges et en assez grand nombre pour le faire rougir, et pour le maintenir rouge pendant un peu longtemps.

Les *effets chimiques* se montrent avec assez d'intensité. Le premier et le plus remarquable de ces effets fut découvert à la fin du dernier siècle (le 30 avril 1800) par Carlisle et Nicholson. Ces deux physiciens, pour répéter les expériences de Volta, avaient construit à la hâte une pile à colonne avec des pièces de monnaie, des plaques de zinc et des rondelles de carton. Après quelques essais, l'odeur particulière de l'hydrogène s'étant fait sentir, Nicholson eut l'heureuse idée de faire passer le *courant électrique* dans un tube plein d'eau, par le moyen de deux fils de métal qui s'approchaient à une petite distance. Bientôt l'hydrogène parut en petites bulles tout autour du *fil négatif*, et le *fil positif* s'oxydait visiblement. Ainsi, les deux éléments de l'eau furent enfin séparés : car Cavendish avait bien pu composer de l'eau avec de l'oxygène et de l'hydrogène, mais jusque-là tous les efforts avaient été impuissants pour la décomposer.

L'appareil qui nous sert maintenant pour la séparation des éléments de l'eau est représenté (Pl. 23, Fig. 10) ; il se compose d'un verre à pied dont le fond est traversé par deux fils de platine $f\ f'$ qui ne doivent pas se toucher ; les cloches o et h, renversées et pleines de liquide, couvrent chacun des fils. Aussitôt qu'on établit la communication avec les pôles de la pile, les bulles de gaz se dégagent en abondance ; l'oxygène pur monte toujours dans la cloche qui couvre le fil positif, et l'hydrogène pur toujours dans celle qui couvre le fil négatif. Il est évident que les deux cloches doivent communiquer entre elles par le liquide intermédiaire, car le courant ne peut pas traverser le verre.

L'eau distillée et parfaitement pure se décompose lentement : mais, dès qu'on y met une goutte d'un acide quelconque, ou quelques atomes de sel, ou quelques parcelles d'une substance qui augmente sa conductibilité, les bulles de gaz se dégagent vivement, et il ne faut que deux ou trois minutes pour avoir

1 centimètre cube d'oxygène dans la cloche positive, et 2 centimètres cubes d'hydrogène dans la cloche négative.

Deux atomes d'hydrogène à l'un des pôles et un atome d'oxygène à l'autre, voilà un phénomène bien surprenant et qui a longtemps exercé la sagacité des physiciens ; car dans les décompositions ordinaires, les éléments se désunissent et ne s'éloignent pas l'un de l'autre, tandis qu'ici il y a tout à la fois séparation et *transport* des éléments séparables. On a fait des tentatives sans nombre pour saisir la molécule d'eau qui se décompose, ou pour arrêter en chemin les atomes gazeux avant qu'ils fussent arrivés aux fils de métal d'où l'électricité passe dans le liquide ; mais rien n'a réussi. Par exemple, quand on met de l'eau dans deux vases, que l'on fait plonger le fil positif dans l'un, le fil négatif dans l'autre, et qu'ensuite on établit la communication entre les vases par un corps conducteur pour que la circulation électrique puisse s'établir, on observe des phénomènes singuliers : si le conducteur intermédiaire est un métal, l'eau est encore décomposée comme à l'ordinaire, mais dans chaque vase séparément ; s'il est un corps humide, quelquefois encore il la décompose comme un métal, mais le plus souvent la décomposition se fait on ne sait où ; l'oxygène paraît seul dans l'un des vases, dans le positif, et l'hydrogène seul dans l'autre ; c'est ce qui arrive, par exemple, quand on établit la communication en plongeant un doigt dans chaque vase. Alors, on semble en droit de conclure que l'un des éléments gazeux a dû traverser le corps pour se rendre au pôle où il se dégage. De même, quand on établit la communication avec un morceau de glace, il semble nécessaire que l'un ou l'autre des gaz passe au travers de la glace, puisque chacun d'eux ne se dégage qu'à l'un des fils métalliques.

Grotthuss a donné, de ces phénomènes et de toutes les autres décompositions chimiques que produit le courant, une explication qui a été admise par tous les physiciens, non-seulement parce qu'elle est ingénieuse, mais aussi parce qu'elle semble tout à fait conforme à la vérité. Concevons une file de molécules d'eau, 1, 2, 3, 4, etc. (Pl. 23, Fig. 5), formant une espèce de chaîne droite ou courbe qui joint le fil positif f au fil négatif f' : l'électricité positive de f agira par influence sur la molécule 1, et la *tournera* pour attirer l'oxygène qui est *électro-négatif*, et pour repousser l'hydrogène qui est *électro-positif;* la molécule 1 agira de même sur la molécule 2, et ainsi de suite ; à l'autre

extrémité de la chaîne, la même disposition se produira, et, dès que la tension électrique sera assez forte, l'oxygène de la molécule 1, entraîné par l'attraction, sera comme arraché des molécules d'hydrogène auxquelles il est uni, et s'en viendra au pôle, tandis que l'hydrogène, devenu libre, se portera sur l'oxygène de la molécule 2 pour se combiner avec lui, donnant la liberté à l'hydrogène de cette molécule, qui s'en ira à son tour prendre l'oxygène de la molécule 3, et ainsi de suite. A l'autre pôle, des phénomènes analogues se produisent en sens inverse, et il y aura ainsi au même instant une foule de décompositions et de recompositions successives. Ce qui se passe dans une file de molécules se passe dans toutes les files qui joignent les deux pôles ; et, de là, la multitude des atomes gazeux devenus libres, et l'abondance des bulles distinctes qui se forment et qui se dégagent.

Ces mouvements vibratoires des derniers éléments de la matière peuvent s'accomplir au milieu des masses solides comme au milieu des masses fluides ; et certainement, si comme tout semble l'indiquer, l'explication de Grotthuss est vraie pour la décomposition des liquides, elle ne peut manquer de l'être pour celle des solides et de tous les autres corps sur lesquels le courant électrique peut avoir quelque prise. Il y a toujours à la fois *décomposition* et *transport* des éléments : l'oxygène, et ses analogues chimiques paraissent toujours au *pôle positif*, tandis que l'hydrogène et ses analogues vont au *pôle négatif*. C'est ce fait fondamental qui a conduit à rapporter toutes les combinaisons à des actions électriques opposées, l'un des éléments étant *électro-positif*, et l'autre *électro-négatif*.

Une expérience curieuse, qui remonte aussi aux premiers temps de la découverte de la pile, fait voir que les sels sont eux-mêmes décomposés ; elle est représentée (Fig. 18) : un tube de verre recourbé est rempli de quelque teinture végétale, telle, par exemple, que celle que l'on obtient en exprimant le suc d'un choux rouge ; on y fait passer le courant au moyen de deux fils de platine, dont les extrémités inférieures sont à quelques millimètres de distance, et bientôt l'on aperçoit une belle couleur rouge de vin paillet dans la branche positive, et une couleur verte dans la branche négative. Ainsi un acide s'est développé dans la première, et un alcali dans la seconde. Il suffit d'établir la communication en sens inverse, pour détruire ces couleurs, et les reproduire dans les branches opposées.

On doit pareillement à Seebeck (*Ann. de Chim.*, mai 1808), la connaissance d'un phénomène singulier qui se produit par l'action de la pile ; il est représenté (Fig. 6). Dans un morceau d'hydrochlorate d'ammoniaque, on creuse une cavité dans laquelle on met quelques gouttes de mercure ; dès que le courant passe, le fil négatif étant dans le mercure, on voit le volume de ce mercure augmenter à vue d'œil ; il croît comme un champignon, prend de la consistance, et devient cinq ou six fois plus grand que le volume primitif. Si l'on supprime les communications, ce champignon décroît peu à peu, et le mercure reprend son état liquide ; l'amalgame qui s'était formé ne subsiste que sous l'influence des courants. (Voy. *Recherches physico-chimiques* de MM. Gay-Lussac et Thénard pour l'analyse chimique de cet amalgame.)

240. Diverses dispositions de la pile. — Pile à auges. — Pile de Wollaston. — Pile en hélice. — Dès que les effets de la pile eurent été constatés au moyen de la pile à colonne, on s'empressa d'imaginer d'autres dispositions plus favorables pour réunir en grand nombre des éléments de grandes dimensions. La pile à colonne se prêtait mal à la composition de ces puissantes batteries, à cause de la pression que les rondelles humides inférieures avaient à supporter de la part des éléments supérieurs.

La pile à colonne fut donc remplacée avec avantage, et elle le fut successivement par la *pile à auges* ou *pile de Cruikshank*, par la *pile de Wollaston* et par la *pile en hélice*.

La *pile à auges* est représentée (Pl. 23, Fig. 7, 8). Les plaques zinc et cuivre sont rectangulaires et soudées l'une sur l'autre pour former un élément ou un couple. Tous les couples sont disposés de champ et parallèlement dans une caisse de bois *bb'*, dont les parois intérieures sont revêtues d'un mastic non conducteur. L'intervalle des deux couples forme une petite auge dans laquelle on met l'eau acidulée : c'est cette lame d'eau d'environ un centimètre d'épaisseur qui remplace la rondelle humide de la pile à colonne ; les auges successives n'ont entre elles aucune communication, ni par les bords, ni par la tranche supérieure des couples. En réunissant plusieurs piles semblables à celle qui est représentée dans la figure, on compose une *batterie galvanique* ou *voltaïque*. La réunion peut se faire de deux manières ; les piles ayant, par exemple, cent couples de chacun 1 décimètre carré : si l'on en réunit deux, en faisant communi-

quer les deux pôles négatifs ensemble, et les pôles positifs ensemble, on aura une batterie de *cent* couples ayant chacun *deux* décimètres carrés; au contraire, si on les réunit en faisant communiquer le pôle positif de la première avec le pôle négatif de la seconde, on aura une batterie de *deux cents* couples ayant chacun 1 décimètre carré.

La *pile de Wollaston* est représentée dans les figures 11, 12, 13. Pour en mieux indiquer la construction, nous examinerons seulement deux couples représentés en section (Fig. 11), et de face (Fig. 12) : *cs* est le premier cuivre, et *sz* le premier zinc, vu par son épaisseur ; ils sont soudés en *s* ; *c's'* est le deuxième cuivre, et *s'z'* le deuxième zinc ; *v* et *v'* sont des vases remplis d'eau acidulée : l'électricité vitrée passe du premier zinc au deuxième cuivre par la couche d'eau qui les sépare ; elle passe de même du deuxième zinc au troisième cuivre, et ainsi de suite. Cette disposition offre surtout deux grands avantages : premièrement, le fluide qui est sur le zinc peut en sortir par tous les points de la surface ; secondement, il n'a qu'une couche liquide très-mince à traverser pour se porter sur le cuivre, et cette couche, qui se trouve promptement altérée dans la pile à auge, peut ici se renouveler en se mélangeant au liquide du vase.

Un seul couple de cette espèce, ayant seulement quelques centimètres carrés de surface, est capable de produire des phénomènes étonnants : il peut, par exemple, faire rougir un fil de platine. L'expérience en est représentée dans la figure 9 : *cs* est le cuivre, *sz* le zinc ; l'enveloppe *c'c'c'* ne sert qu'à favoriser la conductibilité ; un petit fil de platine est tendu de *p* en *p'*, et, quand on plonge ce couple par le manche *m* dans un vase d'eau fortement acidulée, le fil de platine devient rouge à l'instant par le seul effet du courant qui le traverse.

Avec une pile d'une vingtaine de couples, disposée sur deux rangs, comme celle de la figure 13, on peut faire à peu près toutes les expériences galvaniques. On la charge habituellement avec de l'eau contenant $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique et $\frac{1}{20}$ d'acide nitrique.

La *pile en hélice* n'est en réalité qu'une modification de la pile de Wollaston ; elle est surtout destinée à produire de grandes quantités d'électricité sans donner de grandes tensions. Les figures 16 et 17 représentent les dispositions que j'avais adoptées pour la pile de la Faculté des sciences. Sur un cylindre en

bois *b* (Fig. 16) de 1 décimètre de diamètre, et de 3 ou 4 décimètres de longueur, on enroule deux lames, l'une de zinc et l'autre de cuivre, qui sont séparées par des bouts de lisière de drap *l*, joints par de petites ficelles, dont l'épaisseur est un peu moindre que celle de la lisière. On forme ainsi des couples dont les deux éléments ont chacun 5 à 6 mètres carrés de surface. Un seul de ces couples (Fig. 17) est capable de produire des effets physiques très-énergiques, et, lorsqu'on réunit seulement 20 couples pareils, on a une batterie d'une puisssance extraordinaire pour chauffer et liquéfier instantanément, non pas des fils, mais de véritables tiges de métal.

Dans le chapitre vii (*Électro-chimie*), nous ferons connaître d'autres piles, auxquelles, avec raison, tous les physiciens donnent aujourd'hui la préférence; mais avant la découverte de l'électro-magnétisme, les trois dispositions principales que nous venons de décrire étaient presque exclusivement adoptées, soit pour les appareils usuels, soit pour les appareils auxquels on était parvenu à donner une puissance extraordinaire.

La Société royale de Londres fit construire, dès 1806, une batterie de 2000 éléments de 4 ou 5 décimètres carrés chacun, d'après le système des piles à auges. C'est avec cet appareil que Davy parvint à faire, en 1808, la grande et belle découverte de la décomposition de la potasse et de la soude.

En 1808, MM. Gay-Lussac et Thénard avaient, à l'École polytechnique, par une dotation extraordinaire de l'empereur, une batterie de 600 éléments de chacun 9 décimètres carrés de surface. C'est avec cet appareil qu'ils ont fait tant de découvertes si importantes pour la science. (*Recherches philosophico-chimiques*, 2 vol., 1811.)

Peu de temps après, M. Hare, aux États-Unis, avait aussi, sous le nom de *deflagrator*, une batterie capable de produire les effets les plus extraordinaires. Ses éléments étaient disposés d'après un système analogue à celui de la pile en hélice.

Les plus puisssantes machines électriques ordinaires n'ont rien qui approche de ces redoutables batteries. Il suffirait d'établir un instant avec les mains la communication entre les pôles, pour être tué comme par la foudre. Les tiges de platine de 5 ou 6 millimètres de diamètre, et de plus d'un mètre de longueur, placées entre les pôles, sont maintenues à l'état de la plus vive incandescence, et presque en fusion, pendant tout le temps qu'elles joi-

gnent les pôles; les autres métaux entrent pareillement en fusion ou en combustion, suivant qu'ils sont plus ou moins conducteurs de l'électricité, plus ou moins fusibles, et plus ou moins oxydables. Enfin, il n'y a pas de composés chimiques conducteurs dont les éléments ne soient rapidement désunis, lorsqu'ils se trouvent placés entre les pôles de ces batteries.

Cependant, il est rarement nécessaire d'avoir recours à des appareils doués d'une telle puissance. Des piles à auges d'une centaine d'éléments, des piles de Wollaston de 20 ou 30 éléments, ou des piles en hélice de 15 ou 20 éléments, comme nous venons de le dire, suffisent pour donner une idée de ces divers résultats. Alors les commotions deviennent faibles: il est presque toujours nécessaire d'avoir les mains mouillées pour les ressentir. Les effets physiques de fusion et de combustion ne sont rendus sensibles que sur des feuilles minces d'or, d'argent ou d'étain, sur des fils de platine fins et de quelques centimètres de longueur, sur des fils de fer ou d'acier de même dimension, etc. Les effets chimiques se produisent aussi avec une moindre intensité, comme nous le verrons au chapitre VII, où nous pourrons en faire l'analyse.

Ce que nous venons de dire s'applique à la pile de Bunsen qui est presque exclusivement employée aujourd'hui, et qui est représentée (Pl. 23, Fig. 31, 32); l'élément Bunsen vu en coupe (Fig. 31) se compose d'un cylindre creux de charbon *c* convenablement préparé, et d'une plaque, d'un cylindre plein ou d'un cylindre creux de zinc amalgamé *z*; puis d'un vase de verre *v* et d'un vase poreux *d*, fait de terre cuite ou de biscuit de porcelaine. On verse de l'acide azotique concentré dans le vase de verre, et on y plonge le cylindre de charbon, portant en haut un collier de cuivre qui enveloppe le charbon et duquel part le ruban de cuivre *p* qui forme le pôle positif; on ajoute ensuite le vase poreux *d*, dont la porosité est telle que l'acide azotique l'imbibe par le dehors, mais ne pourrait pas le traverser; c'est dans ce vase poreux que l'on met à la fois le zinc et de l'acide sulfurique étendu de 9 ou 10 fois son volume d'eau. Le zinc porte le ruban de cuivre *n* qui forme le pôle négatif. Ces éléments s'assemblent comme on le voit (Fig. 32), le pôle négatif du premier s'adaptant au pôle positif du deuxième, au moyen d'une vis ou d'une pince, et, ainsi de suite de proche en proche jusqu'au dixième dont le pôle négatif reste libre.

Dix ou vingt de ces éléments suffisent pour la plupart des expériences.

Mais lorsqu'on veut produire de grands effets de lumière et de chaleur il faut réunir 50 ou 100 éléments; alors, la commotion d'une telle batterie étant fort à craindre, on se sert de l'excitateur représenté (Pl. 23, Fig. 34); les conducteurs *p* et *n* étant terminés par des baguettes de charbon de cornue, et les communications étant établies, au moment où les charbons sont mis en contact au moyen du manche isolant *m*, on voit jaillir une lumière éblouissante. On peut ensuite relever le charbon supérieur de plusieurs centimètres, suivant la force de la pile, sans que le courant cesse de passer; on obtient ainsi entre les deux charbons une gerbe de feu (Fig. 33, n° 2) qui s'agite et se courbe sous l'influence d'un aimant (Fig. 33, n° 1); si le charbon inférieur est arrangé en capsule (Fig. 33, n° 3), tous les fragments de métal que l'on met dans cette capsule, acier, fer, argent, or, platine, entrent en fusion rapidement et se volatilisent.

241. Piles sèches. — On a construit aussi des piles d'une autre espèce, auxquelles on a donné le nom de *piles sèches*, parce qu'il n'entre que très-peu de liquide dans leur composition. Voici le procédé qui paraît réussir le mieux pour avoir des appareils d'une puissance un peu durable.

On prend des feuilles de papier ordinaire, un peu fort, et humide autant qu'il peut l'être naturellement par un temps pluvieux; d'un côté on colle avec la gélatine, la gomme ou l'amidon, une feuille de zinc laminé et ensuite battu ; sur le revers on met du peroxyde de manganèse très-bien porphyrisé, en l'étalant à plusieurs reprises avec un bouchon, ou seulement avec un morceau de papier. Alors, on superpose dans le même ordre plusieurs feuilles semblables, et, avec une emporte-pièce de 2 ou 3 centimètres de diamètre, on enlève à chaque fois autant de disques qu'il y a de feuilles. Ces disques sont, à leur tour, superposés dans le même ordre, et l'on fait ainsi des piles de 500, de 1000 ou de 2000 couples. Pour mieux assurer le contact, on met les disques en presse, après avoir disposé à chaque bout des pièces de métal assez fortes, portant cinq ou six appendices saillants, qui se lient l'un à l'autre avec du cordonnet de soie; ensuite, pour garantir la pile du contact de l'air, on la plonge dans du soufre fondu ou dans de la gomme laque.

Quelquefois on imbibe le papier avec une légère dissolution

saline, ou bien avec du lait, du miel, du beurre, de l'huile d'œillette, de l'essence de térébenthine, etc.; mais, si les piles qui sont faites par ces moyens ont l'avantage de paraître un peu plus fortes dans les premiers instants, elles ont aussi l'inconvénient de se détériorer promptement, en comparaison des premières, car il est rare qu'après quelques années elles conservent encore toute leur énergie primitive.

Au lieu d'employer le zinc avec l'oxyde de manganèse, on peut sans désavantage employer l'étain.

Ces piles s'appellent aussi piles de Zamboni, parce que ce physicien s'est beaucoup appliqué à en perfectionner la construction. Les piles de Zamboni ont les propriétés suivantes : elles ne donnent aucune commotion et ne produisent aucune décomposition chimique ; cependant, si dans une pile de 1000 ou 2000 éléments, l'on touche un des pôles avec le condensateur à taffetas, on obtient une charge qui donne quelquefois une étincelle. Mais il faut du temps pour que la pile répare ses pertes, soit à cause de la lenteur des actions chimiques qui s'exercent, soit à cause de la mauvaise conductibilité du papier.

Lorsqu'on fait communiquer deux conducteurs isolés, par exemple deux boules de métal, avec les deux pôles d'une pile ou d'un système de piles de Zamboni, on a sur ces boules les deux électricités contraires que l'on peut employer à produire des mouvements alternatifs ou des mouvements continus ; mais il faut avoir soin de proportionner la dépense d'électricité que ces mouvements exigent, à la faiblesse de la source qui répare ces pertes.

Électroscope de Bohnenberger. — M. Bohnenberger a fait des piles sèches une autre application qui semble d'abord assez ingénieuse : après avoir supprimé l'une des feuilles d'or du condensateur à lames d'or, il dispose à égale distance de la feuille restante, les deux pôles d'une pile sèche très-peu énergique ; alors il est évident que la moindre charge d'électricité résineuse ou vitrée détermine cette feuille très-mobile à se porter vers le pôle positif ou vers le négatif, et qu'une fois en mouvement, elle doit continuer ses allées et venues pendant un temps plus ou moins long. Mais cet appareil m'a toujours paru infidèle, soit à cause de l'agitation de l'air de la cloche, soit à cause de l'électricité que cet air reçoit des deux pôles de la pile.

Piles sèches de M. Delezenne. — M. Delezenne a construit

récemment des piles sèches de grandes dimensions (*Mémoires de la Société royale des sciences de Lille*), avec des feuilles de papier étamé de 178 millimètres de longueur, sur 158 millimètres de largeur ; et il a constaté qu'avec 300 de ces éléments convenablement humides et convenablement pressés, l'on obtient des commotions assez vives et une décomposition de l'eau très-sensible.

CHAPITRE II.

De l'action des courants sur les aimants.

242. Découverte de l'électro-magnétisme. — En 1820, Œrsted, professeur à Copenhague, fit la découverte fondamentale qui a donné naissance à l'*électro-magnétisme;* on savait déjà que dans certaines circonstances les puissantes décharges électriques peuvent affecter l'aiguille aimantée; on avait observé, par exemple, sur des vaisseaux frappés de la foudre, que les aiguilles de boussole perdaient la propriété de marquer la route du bâtiment. Plusieurs physiciens, parmi lesquels on peut citer Franklin, Beccaria, Wilson et Cavallo, avaient essayé de reproduire ces phénomènes par la décharge d'une bouteille de Leyde ou par celle d'une grande batterie, et ils étaient en effet parvenus à modifier le magnétisme des aiguilles très-petites, soit en les mettant dans le circuit de l'explosion, soit en les exposant simplement à quelque distance de l'étincelle; mais ces expériences n'ayant pu produire aucun phénomène régulier, on se contenta d'admettre que le choc électrique agissait alors comme le choc du marteau; et le sujet fut abandonné. Un peu plus tard on fit, avec l'électricité de la pile, quelques nouveaux essais qui ne furent pas plus heureux.

Enfin, Œrsted trouva le moyen de faire agir l'électricité sur le magnétisme d'une manière sûre et permanente. Le mode d'action une fois découvert et défini avec précision, les phénomènes fondamentaux se présentèrent d'eux-mêmes à Œrsted; une immense carrière fut ouverte aux savants de tous les pays, et jamais peut être on ne vit, dans une si courte période, la science s'enrichir de tant de vérités nouvelles.

Pour que les fluides électriques agissent sur le magnétisme, il suffit d'une seule condition : il suffit qu'ils soient en mouvement.

En effet, un fil conducteur étant traversé par le courant de la pile, si on en approche une aiguille aimantée, librement suspendue, on la voit qui se dévie de sa position, et qui fait une foule

d'oscillations, sans être en général ni attirée ni repoussée. C'est la première expérience de Œrsted. Lorsqu'on voit une action si vive, qui se fait sentir encore, même à la distance de plusieurs mètres, on s'étonne que, parmi tant d'expériences qui ont été faites avec la pile, le hasard n'ait pas une seule fois offert à l'observation un phénomène de cette nature.

La force qui s'exerce ainsi entre le courant de la pile et le magnétisme de l'aiguille est ce que l'on appelle la *force électro-magnétique*. Il est facile de constater par l'expérience que la force électro-magnétique présente les caractères suivants :

1° Qu'elle diminue à mesure que la distance augmente entre le courant et l'aiguille;

2° Qu'elle s'exerce dans tous les sens et au travers de toutes les substances, excepté au travers des substances magnétiques.

Voici maintenant quelques suppositions qui nous seront utiles pour caractériser les phénomènes d'une manière plus commode et plus précise. Nous admettrons dans le courant une *direction* déterminée, et nous la définirons en disant qu'il va toujours du pôle positif au pôle négatif en passant par le conducteur extérieur qui joint les pôles; ainsi, quand les communications sont établies, et que le mouvement électrique s'accomplit dans tout le circuit de la pile, nous dirons, en parlant de l'arc *pa*, qui touche au pôle positif, que le courant le traverse en passant de *p* en *a* (Pl. 19, Fig. 1); pareillement *ab* est traversé de *a* en *b*, *bc* de *b* en *c*, etc.; et, en considérant le circuit complet, nous dirons toujours que le courant va de *n* en *p* en passant par la pile, et de *p* en *n* en passant par le conducteur. Nous désignerons souvent le courant par les formes et par les dimensions du conducteur qu'il traverse; quand il passe par un conducteur rectiligne, nous l'appellerons *courant rectiligne;* par un fil très-fin, *courant linéaire;* par un cylindre creux, *courant cylindrique;* par un fil courbe, *courant curviligne;* par un cercle, *courant circulaire;* par un conducteur indéfini dans sa longueur, *courant indéfini;* par un conducteur rentrant sur lui-même et formant un circuit complet, *courant fermé*, etc. Aucune de ces expressions ne doit être prise à la lettre : quand nous disons qu'il y a un courant dans le conducteur qui joint les deux pôles de la pile, nous ne voulons nullement faire entendre qu'il y a dans ce conducteur un mouvement de translation du fluide vitré depuis le pôle positif jusqu'au pôle négatif, et un mouvement de

translation du fluide résineux en sens inverse, car il est probable, au contraire, comme nous l'avons déjà indiqué plusieurs fois, que la recomposition des électricités se fait autour de toutes les molécules pondérables et dans tous les intervalles qui les séparent.

243. Le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui, le pôle austral à gauche. — La figure 2 représente une aiguille aimantée *ba*, au-dessus de laquelle passe horizontalement un courant rectiligne *cc'*, situé dans le plan du méridien magnétique, et dirigé de *c* en *c'*; l'aiguille est chassée hors de sa direction primitive; son pôle *austral* est poussé à l'*occident*, et, après quelques oscillations, elle s'arrête dans la position *b'a'*, éprouvant ainsi une déviation mesurée par l'arc *aa'*. Cette déviation augmente ou diminue suivant que l'on abaisse le courant pour l'approcher plus près de l'aiguille, ou qu'on le relève pour l'en éloigner.

Les choses étant ramenées au premier état, si de nouveau l'on approche le courant, mais en le retournant pour qu'il aille en sens contraire, de *c* en *c'*, comme il est marqué par la petite flèche ponctuée, l'aiguille éprouve encore les effets de sa présence; alors son pôle *austral* est poussé à l'*orient*, et c'est dans la position *b'' a''* qu'elle vient s'arrêter.

Ainsi, *au-dessus* de l'aiguille, le courant dévie le pôle austral à l'occident quand il vient lui-même du sud au nord, et il le dévie à l'orient quand il vient au contraire du nord au sud.

On peut répéter les mêmes expériences en faisant passer le courant *au-dessous* de l'aiguille, toujours horizontalement et dans le plan du méridien magnétique : alors, chose surprenante, les effets sont précisément inverses, c'est-à-dire que le pôle austral est poussé à l'orient quand le courant va du sud au nord, et poussé à l'occident quand il vient du nord au sud.

Dans ces phénomènes la force électro-magnétique est combattue par l'action directrice que la terre exerce sur l'aiguille; et pour observer l'effet seul de cette puissance nouvelle qui agit d'une manière si énergique et en même temps si singulière, il est nécessaire de neutraliser la force terrestre : c'est ce que l'on peut faire très-simplement, en disposant, par exemple, un barreau horizontal, dans le plan du méridien magnétique, et sur le prolongement de l'aiguille, on découvre alors le vrai caractère de la force électro-magnétique : on voit qu'elle n'est ni une

force attractive, ni une force répulsive, mais une force *directrice* qui tourne toujours l'aiguille perpendiculairement au fil conducteur, sans attirer un pôle de préférence à l'autre, c'est-à-dire que la ligne des pôles est toujours *en croix* avec le courant. Pour prendre une idée plus nette de cette direction, concevons un cylindre creux, d'une longueur quelconque, et, par exemple, d'un décimètre de diamètre ; suivant l'axe de ce cylindre, imaginons un fil conducteur traversé par le courant, et sur sa surface une aiguille aimantée qui puisse se mouvoir librement dans tous les sens : l'effet de la force électro-magnétique sera tel, que l'aiguille se mettra toujours tangentiellement au cylindre, et transversalement à ses arêtes ; ou, en d'autres termes encore, si du milieu de l'aiguille on abaisse une perpendiculaire sur le courant, l'aiguille, dans son équilibre sous l'influence de la force électro-magnétique, sera elle-même perpendiculaire au plan qui passe par cette perpendiculaire et par le courant. Ce n'est pas assez de définir ainsi la direction de l'aiguille, il faut encore assigner la position de ses pôles, déterminer de quel côté se trouve le pôle boréal, de quel côté le pôle austral, soit que le courant se propage dans un sens ou dans l'autre. Dans les premiers temps, on éprouvait de grands embarras pour exprimer en peu de paroles ces rapports de position et de direction qui se compliquent de mille manières; mais Ampère a levé toutes ces difficultés au moyen d'une comparaison qui semblera peut-être aussi bizarre qu'elle est ingénieuse. Ampère ne se contente pas de donner une direction au courant, il lui donne encore une *tête*, des *pieds*, une *droite* et une *gauche ;* il en fait un homme. Concevons dans une portion quelconque du fil conducteur une petite figure d'homme couchée dans le sens de la longueur, les pieds du côté du pôle positif, et la tête du côté du pôle négatif, de telle manière que, d'après notre définition précédente, le courant entre par les pieds et sorte par la tête; concevons que cette figure ait *toujours* la face tournée vers le milieu de l'aiguille sur laquelle agit le courant : alors l'effet est tel que l'aiguille se trouve *en croix*, comme nous venons de le voir, et toujours son pôle austral vers la gauche de la petite figure d'homme; ce que nous exprimons en disant qu'elle se tourne en croix avec le courant, son pôle austral à gauche. Cette espèce de formule singulière offre une image facile qui supplée à beaucoup de paroles; ceux qui voudront l'appliquer à toutes les expériences que nous avons

déjà citées, n'auront pas besoin d'un long exercice pour reconnaître qu'elle est en même temps très-fidèle et très-commode.

244. De la rotation des aimants par l'influence des courants. — Le phénomène curieux de la rotation des aimants par l'action des courants a été indiqué par le docteur Wollaston, et démontré par M. Faraday, à une époque où l'on n'avait encore que des notions très-incomplètes sur les forces électro-magnétiques.

Voici d'abord le détail des expériences : une large éprouvette de verre *vv′* (Fig. 14) est remplie de mercure jusqu'à une petite distance de ses bords; un aimant cylindrique *ab*, lesté avec un contre-poids de platine *p*, se tient debout dans le mercure, de manière que son pôle *a* s'élève de quelques millimètres au-dessus du niveau (cet aimant est représenté un peu plus en grand dans la figure 13); une tige *t*, que l'on peut élever ou abaisser à volonté au moyen d'une vis de pression, vient plonger dans le mercure par son extrémité inférieure, tandis qu'elle communique, par son autre extrémité, avec un conducteur en cuivre *c*, qui communique lui-même avec l'un des pôles de la pile; enfin, le conducteur *c′*, qui tient à l'autre pôle, passe sur le bord de l'éprouvette et plonge dans le mercure très-près de son contour extérieur. On lui donne la forme d'un anneau pour que tout soit symétrique. Dès que la communication est établie, l'aimant tourne dans le même sens d'un mouvement plus ou moins rapide, et fait des révolutions successives autour de la tige *t*; il a bien quelque tendance à venir la toucher et à tourner alors plus rapidement, mais, avec quelques soins, il est facile de l'ajuster pour qu'il se maintienne à distance; cependant il faut un puissant appareil pour que la rotation soit régulière et rapide.

Mais l'on peut disposer l'expérience d'une autre manière qui donne toujours une grande vitesse, même avec des piles ordinaires de 10 à 12 couples. C'est cette disposition qui est représentée dans la figure 14. La petite cavité qui se trouve à l'extrémité de l'aimant, et par laquelle il peut se visser sur le contre-poids de platine, forme une espèce de petite coupe *g* (Fig. 13) que l'on remplit de mercure; on abaisse la pointe de la tige *t* de manière qu'elle plonge dans ce mercure sans toucher à l'aimant, qui conserve ainsi toute sa mobilité; ensuite on éta-

blit les communications avec les deux pôles de la pile comme dans l'expérience précédente : alors, l'aimant tourne sur lui-même comme une toupie, et avec une grande vélocité.

Dans le premier mode d'expérience, le sens du mouvement s'établit toujours comme si le pôle austral était poussé à la gauche du courant; dans le second mode, le pôle est immobile, mais le mouvement s'accomplit comme dans le premier cas, quant à sa direction. Nous verrons dans le chapitre IV l'explication de ces phénomènes.

245. L'intensité de l'action du courant est en raison inverse de la simple distance. — Cette loi fondamentale a été démontrée par MM. Biot et Savart, au moyen d'un appareil qui est représenté dans la figure 3. *ab* est une aiguille aimantée, semblable aux petites aiguilles d'épreuve dont nous avons parlé (**197**); elle est suspendue à un fil de cocon au moyen d'une petite chape de cuivre, et se trouve abritée de l'agitation de l'air par une cloche de verre. L'action de la terre est neutralisée par un barreau convenablement placé, en sorte que cette aiguille n'a plus de force directrice; elle est indifférente et prête à obéir sans résistance aux nouvelles forces que l'on fait agir sur elle; *cd* représente la direction d'un gros fil de cuivre de 2 ou 3 mètres de longueur, tendu verticalement et traversé par un courant, tantôt de haut en bas, tantôt de bas en haut. Pour fixer les idées, nous supposerons que le courant est ascendant : ce fil, toujours vertical, peut être porté à diverses distances de l'aiguille, qui, dans toutes ses positions, correspond sensiblement au milieu de sa longueur. D'après la loi que nous venons d'indiquer, l'aiguille se met en croix avec le courant, le pôle austral à gauche, comme le représente la figure; mais, pour peu qu'on l'écarte de cette position, elle y revient par des oscillations isochrones, dont la durée dépend de l'énergie électro-magnétique. Le nombre des oscillations faites dans un temps donné, la distance du courant et l'intensité de la force qu'il exerce, sont donc trois choses liées entre elles.

Dans une première expérience, soient d la distance du courant au milieu m de l'aiguille, e l'intensité de la force qu'il exerce, et n le nombre des oscillations qui s'exécutent dans un temps donné, dans une minute, par exemple.

Dans une deuxième expérience, soient d', e' et n' les quantités analogues.

Les intensités des forces qui produisent des oscillations isochrones étant toujours entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps, nous aurons (**196**) :

$$\frac{e}{e'}=\frac{n^2}{n'^2}.$$

Ainsi, après avoir observé les oscillations, il est facile de comparer les intensités des forces. C'est par des comparaisons de cette espèce, pour des distances comprises entre 15 et 120 millimètres, et en prenant les précautions convenables pour obvier aux variations de la pile, que MM. Biot et Savart ont reconnu qu'en effet *l'intensité de la force électro-magnétique est en raison inverse de la simple distance.*

Mais il ne faut pas perdre de vue que, d'après la disposition de l'appareil, le courant est rectiligne et d'une longueur que l'on peut regarder comme indéfinie par rapport à la longueur de l'aiguille, et surtout par rapport à sa distance ; c'est sous ces conditions seulement que la loi est vraie. Laplace a démontré que la force électro-magnétique élémentaire, c'est-à-dire celle qui est exercée par une seule section du courant, est *en raison inverse du carré de la distance*, comme toutes les autres forces connues, et proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction du courant et par la ligne menée du milieu de cette section au milieu de l'aimant. En effet, en calculant d'après ce principe la somme de toutes les actions élémentaires qui sont exercées sur une petite aiguille par un courant rectiligne indéfini, on trouve que l'intensité de cette résultante totale doit diminuer comme l'expérience l'indique, c'est-à-dire en raison inverse de la simple distance.

Il résulte encore de cette même loi de la force élémentaire, que l'intensité de l'action d'un courant angulaire indéfini, tel que *emf* (Fig. 3), sur une aiguille *ab*, est en raison inverse de la distance *am*, comme celle d'un courant rectiligne, mais qu'elle est proportionnelle à la tangente de la moitié de l'angle *emz ;* ainsi, en prenant pour unité l'intensité de l'action de *cd* sur l'aiguille *ab*, l'intensité de l'action de *emf* serait représentée par :

$$\operatorname{tang} \tfrac{1}{2} emz.$$

C'est ce que M. Biot a aussi vérifié par l'expérience ; et l'on

voit que, si le courant *emf* se redresse au point de se confondre avec *cd*, il arrive que l'angle *emz* étant alors un angle droit, la tangente de $\frac{1}{2}$ *emz* devient égale à l'unité comme cela doit être.

246. Conditions d'équilibre d'une aiguille aimantée soumise à l'action d'un courant rectiligne indéfini. — La loi précédente n'est vraie qu'à partir d'une distance qui est au moins cinq ou six fois plus grande que la longueur de l'aiguille. Pour de moindres distances les phénomènes se présentent sous un autre aspect : soient, par exemple, *a*, *b* (Fig. 4) les deux pôles d'une aiguille horizontale, *acbd* le cercle qu'ils peuvent décrire, et *ll'* une perpendiculaire élevée sur le milieu de l'aiguille, et prolongée indéfiniment des deux côtés. Voici ce que l'on observe lorsqu'on fait agir sur l'aiguille un courant vertical indéfini, que pour plus de simplicité nous supposerons toujours ascendant, c'est-à-dire s'élevant au-dessus du plan de la figure.

1° Lorsque le courant se trouve sur quelque point de la circonférence *abcd*, il ne tend plus à mettre l'aiguille en croix avec lui, il la laisse parfaitement en repos, et ne la fait tourner ni dans un sens ni dans l'autre.

2° Lorsque le courant est dans le *quadran amc*, il attire à lui le pôle austral jusqu'au contact ; au contraire il attire à lui le pôle boréal quand il est dans le *quadran bmc* : dans les *quadrans amd* et *bmd* il produit des effets inverses. Par conséquent, l'équilibre est instable lorsque le courant est sur *mc*, et il est stable quand il est sur *md* : tandis qu'au contraire on observe la stabilité sur *cl*, et l'instabilité sur *dl'*.

Dans un Mémoire lu à l'Académie des sciences en 1822, et imprimé par extrait dans les *Ann. de Chim.* (t. XXI, p. 77), j'ai analysé ces phénomènes et tous ceux qui dépendent des renversements d'action à petite distance, soit sur une aiguille mobile autour de son centre, soit sur une aiguille mobile autour d'un point quelconque. Il résulte des expériences et du calcul, que tous ces phénomènes peuvent être expliqués au moyen du principe suivant, que je me borne à énoncer ici : l'action qui s'exerce entre un courant rectiligne indéfini et le pôle d'un aimant forme un système de deux forces parallèles égales et contraires composant un couple ; ces forces sont perpendiculaires au courant et perpendiculaires à la plus courte distance du cou-

rant au pôle de l'aimant, et leur direction est telle que le pôle austral est toujours poussé à gauche et le pôle boréal toujours à droite; l'intensité du courant est en raison inverse de la distance du courant au pôle de l'aimant.

Ce même principe explique pareillement tous les phénomènes d'équilibre que présentent les aiguilles soumises à des conditions quelconques, comme les aiguilles flottantes à la surface des liquides, ou celles qui se meuvent autour d'un point ou d'un axe quelconque.

247. Multiplicateur ou galvanomètre. — Peu de temps après la découverte de OErsted, M. Schweiger imagina le *galvanomètre*, que l'on appelle aussi *multiplicateur*, parce qu'il multiplie en effet la force électro-magnétique. Cet instrument, qui est d'une sensibilité merveilleuse pour découvrir les moindres traces de l'électricité en mouvement, repose sur ce fait, qu'un courant circulaire ou polygonal, ou ayant en général une forme rentrante quelconque, agit par toutes ses parties pour diriger, dans le même sens, une aiguille aimantée qu'il enveloppe de toutes parts, et ce fait n'est qu'une conséquence de la proposition générale que nous avons établie (**245**). En effet, toutes les parties du courant qui parcourt, par exemple, les côtés du rectangle *pqron* (Fig. 5), agissent de la même manière sur une aiguille *ab* mobile autour du centre de la figure, et qui peut se tourner perpendiculairement à son plan : le côté *no* tend à tourner le pôle austral en avant de la figure, et le pôle boréal derrière; il en est de même du côté *qr*, du côté *or* et du côté *pq*. Ainsi, l'aiguille devra se tourner avec beaucoup d'énergie perpendiculairement au plan de la figure, le pôle austral en avant. Un deuxième circuit de même intensité, allant dans le même sens, produit sur elle un effet égal; il en serait de même d'un troisième, d'un quatrième, d'un centième; donc, un fil conducteur enroulé sur lui-même et formant cent tours, doit, quand il est traversé par le même courant, produire un effet cent fois plus grand qu'un fil d'un seul tour : seulement, il faut que les fluides parcourent toutes les circonvolutions du fil sans passer latéralement d'un contour à l'autre; c'est une condition facile à remplir. On prend pour cela un fil d'argent ou de cuivre rouge de quinze ou vingt mètres de longueur, de quelques fractions de millimètre d'épaisseur, et revêtu d'un fil de soie dont les tours sont très-serrés; on l'enroule sur un petit cadre de bois ou de

métal, à peu près comme du fil sur une bobine; seulement, on laisse libre 1 ou 2 mètres de longueur à chaque extrémité, c'est ce qu'on appelle *les deux fils du multiplicateur;* le courant doit entrer par l'un et sortir par l'autre : l'aiguille aimantée qui doit servir d'index est suspendue à un fil de cocon, et tout l'appareil est recouvert d'une cloche qui le garantit des agitations de l'air. Lorsqu'on veut faire une expérience, on tourne le cadre dans la direction du méridien magnétique : l'aiguille est alors dans le plan du cadre, et l'effet du courant la dévie de cette position d'un angle plus ou moins grand, suivant qu'il est plus ou moins énergique; dans cette position, la force électro-magnétique est combattue par la force magnétique de la terre, qui agit incessamment sur l'aiguille pour la ramener dans le méridien magnétique.

Ce premier multiplicateur est déjà très-sensible, mais Nobili a rendu sa sensibilité incomparablement plus grande en employant au lieu d'une seule aiguille, un système de deux aiguilles compensées. En effet, si les deux aiguilles *ab* et *a'b'* (Pl. 15, Fig. 29 et 30), ont leurs pôles opposés l'un à l'autre, de manière que leur ensemble ne conserve plus qu'une force directrice très-faible, et qu'on les dispose l'une dans l'intérieur du circuit, et l'autre à l'extérieur (Pl. 19, Fig. 6), il est facile de voir que le courant agit sur l'une et sur l'autre pour les faire tourner dans le même sens; ainsi, l'action du courant est presque double; et comme, d'une autre part, la force directrice est réduite à sa centième ou à sa millième partie, il en résulte que rien ne limite la sensibilité d'un *galvanomètre* compensé.

On comprend toutefois que, par la réaction des aiguilles, leur état magnétique changeant d'un instant à l'autre, la force directrice, et par conséquent la sensibilité du galvanomètre, est elle-même changeante.

Pour lier entre elles les aiguilles de la manière la plus fixe, on se contente en général de les planter dans un brin de paille bien droit, ou de les attacher par un fil de métal.

L'aiguille supérieure se meut sur un cadran divisé en 360 degrés, la ligne 0 et 180 correspondant à la direction du fil sur le cadre, de telle sorte que les aiguilles soient bien exactement parallèles au fil lorsqu'elles sont au zéro, c'est-à-dire dans leur position d'équilibre. La déviation augmente avec l'intensité du courant; mais l'on comprend qu'elle ne peut en aucune façon

être proportionnelle à cette intensité, si ce n'est pour les déviations de 8 ou 10°.

La figure 7 représente un galvanomètre complet.

Dans plusieurs expériences il est quelquefois utile d'employer un *galvanomètre différentiel* : on appelle ainsi un galvanomètre composé avec deux fils parfaitement égaux pour leur longueur, leur diamètre et leur conductibilité ; ces deux fils sont enroulés simultanément sur le cadre, et, lorsqu'on fait passer par chacun d'eux des courants opposés, on n'observe sur les aiguilles que la différence de leurs actions, en sorte que l'instrument reste au zéro lorsque les courants sont parfaitement égaux.

Le galvanomètre sert, comme nous le verrons plus tard, à une foule d'expériences remarquables ; mais, si l'on veut dès à présent donner une idée de sa sensibilité, il suffit, par exemple, de plonger les extrémités des deux fils dans de l'eau acidulée, alors on verra un courant agiter les aiguilles ; on peut encore sur une plaque de cuivre mettre une feuille de papier mouillée, et sur le papier une lame de zinc ; alors, l'un des fils du galvanomètre étant mis en contact avec le cuivre, et l'autre fil en contact avec le zinc, on aura presque toujours un courant plus ou moins énergique : en mouillant le papier avec de l'eau un peu acide ou un peu alcaline, le courant prend une bien plus grande énergie. Nous verrons plus loin que cette action est due plutôt à l'action chimique qu'au simple contact des métaux différents.

Il sera toujours facile, par le sens du mouvement des aiguilles, de reconnaître dans quel sens marche le courant.

248. De l'aimantation par le courant de la pile et par l'électricité ordinaire. — Le courant électrique n'agit pas seulement sur le magnétisme libre, mais il est capable de décomposer les magnétismes naturels de tous les corps magnétiques, et d'aimanter avec autant de puissance que les plus forts aimants. Pour montrer l'action du courant sur le fer doux, il suffit de plonger dans de la limaille une portion du fil qui joint les deux pôles de la pile, comme l'a fait Arago ; à l'instant la limaille s'enroule autour du fil et y reste adhérente tant que passe le courant, mais elle se détache et tombe aussitôt que le circuit est rompu. De petites aiguilles d'acier présentées au courant s'y attachent pareillement, en se mettant en croix avec lui ; puis elles conservent leur magnétisme quand on les sépare. Cependant, d'après ce que nous avons vu, pour donner au courant toute son effica-

cité, il est évident qu'il faut le faire passer transversalement autour des aiguilles, ou, pour mieux dire, autour de chacune de leurs sections. On y parvient de la manière suivante :

On enroule un fil de métal en *hélice* sur un tube de verre (Fig. 9), on place l'aiguille dans ce tube, et l'on fait passer le courant de l'une à l'autre extrémité du fil de l'hélice : un seul instant suffit pour qu'il développe tout le magnétisme qu'il est capable de développer dans ces circonstances ; car, après un contact qui n'a que la durée de l'étincelle, l'aiguille disposée dans le tube se trouve aimantée complétement. La rapidité, ou plutôt l'instantanéité avec laquelle le courant peut vaincre la résistance de la force coercitive est un phénomène très-remarquable.

On distingue deux espèces d'hélices : l'hélice *dextrorsum* (Pl. 19, Fig. 9), dans laquelle le fil s'enroule vers la *droite;* et l'hélice *sinistrorsum* (Fig. 10), dans laquelle il s'enroule vers la gauche, en supposant toutefois qu'on les tienne de la même manière; mais, pour en donner une idée plus juste, il suffit de dire que le *tire-bouchon* ordinaire et toutes les vis sont des hélices *dextrorsum*.

Dans l'hélice *dextrorsum* le pôle boréal de l'aiguille est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant, ou bien à l'extrémité positive du fil; et dans l'hélice *sinistrorsum*, au contraire, c'est le pôle austral de l'aiguille qui se trouve à l'extrémité positive.

Lorsqu'on fait, sur le même tube, plusieurs hélices contraires à la suite l'une de l'autre (Fig. 11), l'aiguille offre alors, dans son magnétisme, *un point conséquent* à la jonction des deux hélices ; ainsi, chacune d'elles agit encore comme si elle était seule.

Avec une hélice deux fois renversée, on aurait deux points conséquents, et ainsi de suite. Si l'on faisait de la sorte une hélice à *pas* très-petits, et composée alternativement d'un tour *dextrorsum* et d'un tour *sinistrorsum*, on produirait sur l'aiguille aimantée une distribution de magnétisme très-singulière ; ou plutôt l'effet définitif serait tel qu'elle semblerait avoir conservé son état naturel.

C'est en partant de ces principes que j'ai fait construire en 1831 des *électro-aimants* d'une très-grande puissance, capables de porter des poids de plus de mille kilogrammes (Pl. 19, Fig. 8,

et Pl. 21, Fig. 13, 14); il suffira d'expliquer ici la première disposition, la seconde, qui est d'ailleurs décrite n° 270, se comprendra aisément à l'aspect des figures : un cylindre de fer doux de 5 centimètres de diamètre et d'une longueur convenable, est courbé en fer à cheval (Pl. 19, Fig. 8); sur chacune de ses branches, dans une longueur d'environ 20 centimètres, on enroule bien régulièrement plusieurs centaines de mètres de longueur d'un fil de cuivre couvert de soie, toujours dans le même sens; avec l'attention, quand on passe à la seconde branche après avoir terminé la première, d'enrouler en sens inverse afin d'avoir deux pôles contraires en *a* et *b*. Alors, quand on fait passer le courant dans le fil de cuivre, la masse de fer prend une puissance magnétique extraordinaire : si on lui présente une large pièce de contact, elle y adhère avec une force presque égale à la cohésion du fer; si on lui présente des boulons, des clous, des clefs, elle les attire de loin et forme l'espèce de chaîne magnétique représentée par la figure. Mais faites cesser le courant, à l'instant toute cette puissance disparaît.

L'électro-aimant est donc un aimant passager qui agit ou qui n'agit pas, suivant que le courant passe ou ne passe pas.

M. Froment a imaginé, en 1846, un appareil très-ingénieux pour mesurer la rapidité avec laquelle l'électro-aimant peut prendre et perdre sa puissance (Pl. 19, Fig. 12). Le contact *c* de l'électro-aimant *ab* est attaché à un ressort dont on règle à volonté la tension au moyen des vis *v* et *v'*; de plus, les communications électriques sont établies de telle sorte que le courant ne passe jamais quand le contact est *en prise*, et qu'il passe toujours quand le contact n'est pas en prise. Ainsi, lorsqu'on met l'appareil en communication avec une pile de Bunsen de deux ou trois éléments, le courant passe d'abord, et le contact est attiré vers l'électro-aimant; mais le mouvement qu'il fait pour s'avancer ouvre le circuit et il cesse d'être attiré, son ressort l'éloigne et le remet au repos, là il ferme le circuit, est attiré de nouveau, et ainsi de suite. La pièce de contact se met donc en vibration entre le point où elle est en repos et le point où elle est en prise; et le son qui en résulte indique le nombre des vibrations qu'elle fait en 1". On démontre ainsi que dans certains appareils on peut ouvrir et fermer le circuit plusieurs centaines de fois en une seconde; dans d'autres appareils où le fer de l'électro-aimant a de la force coercitive, le nombre des vibrations est incomparablement plus

restreint; ce phénomène, comme nous le verrons, a beaucoup d'importance pour la télégraphie électrique.

L'aimantation par l'électricité ordinaire donne naissance à plusieurs phénomènes curieux que nous allons examiner.

1° Le courant *direct* que l'on obtient en faisant communiquer les conducteurs avec les coussins, ne produit que de très-faibles effets, lorsqu'il passe simplement par un fil droit. Les aiguilles, même très-fines, que l'on expose transversalement à une petite distance de ce fil, ne s'aimantent pas quand le courant est *continu*, mais elles commencent à prendre des quantités sensibles de magnétisme lorsqu'on fait passer le courant par petites étincelles; leur magnétisme augmente quand les étincelles deviennent plus fortes et partent de plus loin; enfin, l'action du courant de la machine, comme celle du courant de la pile, s'augmente au moyen des hélices; alors de vives étincelles produisent beaucoup d'effet sur les aiguilles qui sont dans le tube de l'hélice, et même M. Ridolfi est parvenu, par ce moyen, à développer du magnétisme avec un courant continu.

2° Les décharges des bouteilles de Leyde et des batteries ont une puissance magnétique considérable, soit qu'elles traversent des fils droits, soit qu'elles traversent des hélices à pas plus ou moins serrés (Fig. 9, 10, 11). D'abord on avait obtenu, par l'un et l'autre moyen, des résultats identiques à ceux que produit la pile : on avait trouvé que, près des fils droits, les aiguilles transversales s'aimantent, le pôle austral à gauche, et que, dans les tubes des hélices, elles s'aimantent, le pôle austral à l'extrémité négative pour les hélices *dextrorsum*, et à l'extrémité positive pour les hélices *sinistrorsum*. C'est en effet ce qui arrive assez souvent; mais Savary a découvert plusieurs phénomènes remarquables, qui semblent établir une différence fondamentale entre le courant continu de la pile et les *chocs électriques* des batteries. (*Ann. de Chimie*, t. XXXIV.)

Quand le choc est transmis par *un fil droit*, des aiguilles égales, parallèles, placées transversalement du même côté du fil et à des distances différentes, ne sont point aimantées dans le même sens : les unes sont aimantées *positivement*, c'est-à-dire, que leurs pôles sont disposés comme ceux d'une aiguille aimantée d'avance, qui serait libre de se mouvoir sous l'action d'un courant paisible et continu passant par le fil; tandis que les autres sont aimantées *négativement*, c'est-à-dire en sens contraire des premières.

Savary a reconnu que ces alternatives, et les distances auxquelles elles se manifestent, dépendent, pour ainsi dire, de tous les éléments qui concourent au phénomène, savoir : de l'intensité de la décharge, de la longueur du fil tendu en ligne droite, de son diamètre, de l'épaisseur des aiguilles et de leur force coercitive. En général, les fils très-fins, et les forces coercitives très-faibles, présentent des alternatives moins nombreuses; souvent même, avec ces conditions, l'aimantation est toujours positive, et les périodes ne sont plus marquées que par des différences d'intensité.

Quand le choc est transmis par des *fils roulés en hélice* sur des tubes de verre ou de bois, il exerce encore des effets analogues sur des aiguilles successivement placées dans l'axe des tubes; alors, la seule variation d'intensité dans la charge de la batterie peut avoir une grande influence.

Enfin, Savary a constaté, par de nombreuses expériences, un autre fait qui dépend sans aucun doute des phénomènes d'induction dont nous nous occuperons plus loin (ch. VIII). La quantité de magnétisme que prend une aiguille sous l'influence d'une décharge électrique, et même le sens de son aimantation, dépendent de la nature et des dimensions des corps qui la touchent ou qui l'enveloppent. Dans une hélice pareille aux précédentes, et traversée par une décharge électrique, une aiguille ne peut plus prendre de magnétisme quand elle est enveloppée d'un cylindre de cuivre assez épais : à mesure que l'épaisseur diminue, le magnétisme devient sensible, et pour une épaisseur assez petite, il devient plus considérable qu'il ne serait pour une aiguille nue et isolée dans l'axe de l'hélice. L'étain, le fer et l'argent, placés autour de l'aiguille, lui donnent des propriétés analogues, c'est-à-dire, qu'en feuilles très-minces ils la rendent plus apte à recevoir le magnétisme, et qu'en cylindres suffisamment épais ils lui ôtent tout à fait la propriété d'être aimantée par le choc électrique. Des cylindres de limaille métallique ne produisent pas cet effet, tandis que des couches concentriques, alternativement métalliques et non métalliques, le produisent; d'où il semble résulter que les solutions de continuité perpendiculaires à l'axe de l'aiguille ou à l'axe des cylindres ont une grande influence sur leurs propriétés.

248 *bis*. Surfaces polaires des électro-aimants et champ magnétique. — On peut faire des électro-aimants de toutes les

formes et de toutes les dimensions ; mais, ce qui est un avantage encore plus considérable, on peut leur adapter, avec plus de facilité qu'aux aimants naturels ou artificiels, des armatures diverses propres à transporter la puissance magnétique, à la disperser, à la concentrer ou en général à la distribuer suivant le but que l'on se propose. Veut-on, par exemple, la concentrer dans un très-petit espace ; on adapte, d'une manière fixe ou mobile, aux extrémités des électro-aimants des masses coniques de fer doux qui se terminent vers leur sommet par des surfaces arrondies plus ou moins aiguës ; veut-on, au contraire, l'étaler sur de grandes surfaces ; on emploie des masses de fer doux cylindriques, d'une épaisseur suffisante et d'un diamètre deux ou trois fois plus grand que le diamètre du fer de l'électro-aimant lui-même. Dans le premier cas, l'action magnétique s'exerçant sur de petits corps et à de petites distances devient plus énergique que n'aurait pu l'être la surface polaire naturelle de l'électro-aimant; dans le second cas, on obtient ce que M. Faraday a appelé le *champ magnétique*, soit que l'action s'exerce au moyen d'un seul pôle, soit qu'elle s'exerce par deux pôles opposés, mis en présence à des distances plus ou moins grandes. L'*axe du champ* et l'axe commun des pôles agissants.

On admet, en général, qu'il est possible de composer ainsi des *champs d'égale intensité*, c'est-à dire, dans lesquels la résultante des actions magnétiques soit partout constante sur l'axe et à une certaine distance autour de lui, excepté toutefois aux limites du champ ou très-près des surfaces polaires elles-mêmes. Voici sur ce point les formules auxquelles j'ai été conduit, et quelques tableaux numériques auxquels j'ai eu souvent recours dans mes recherches.

r, est le rayon du cercle qui forme la surface polaire de l'électro-aimant;

a, est, sur l'axe, la distance du point sur lequel cette surface polaire exerce son action ;

m, est l'intensité de la force que l'élément de la surface polaire exercerait à la distance prise pour unité;

π, le rapport de la circonférence au diamètre;

φ, la résultante des actions de l'un des pôles de l'électro-aimant, sur le point qui est placé sur l'axe à la distance a de la surface polaire.

La valeur de φ est donnée par cette expression :

$$\varphi = m\left\{\frac{1}{a^2} + 2\pi\left(1 - \frac{a}{\sqrt{a^2+r^2}}\right)\right\}.$$

Ce qui suppose toutefois que m est constant, c'est-à-dire, que tous les éléments de la surface polaire, pris à part, peuvent être considérés comme des pôles magnétiques capables d'exercer à la même distance des actions égales. Si cette supposition n'est pas toujours mathématiquement exacte, je regarde comme certain qu'elle l'est expérimentalement, lorsqu'on donne des dimensions convenables en épaisseur et en diamètre aux plaques cylindriques ou polygonales que l'on a coutume de visser sur les extrémités des électro-aimants.

Le tableau suivant contient les valeurs numériques du facteur de m, pour des surfaces polaires ayant des rayons de 30, de 50, de 70 et de 100 millimètres, et pour des distances croissant de 10 en 10 millimètres depuis 10 jusqu'à 100.

Tableau du décroissement des intensités dans l'axe du champ magnétique.

DISTANCES en millimètres.	INTENSITÉS pour $r=30^{mm}$.	RAPPORTS des intensités.	INTENSITÉS pour $r=50^{mm}$	RAPPORTS des intensités.	INTENSITÉS pour $r=70^{mm}$.	RAPPORTS des intensités.	INTENSITÉS pour $r=100^{mm}$.	RAPPORTS des intensités.
mm.								
10	4,297	»	5,068	»	5,395	»	5,658	»
20	2,799	0,65	3,950	0,78	4,557	0,84	5,031	0,89
30	1,566	0,66	3.050	0 77	3,808	0,81	4,478	0,89
40	1,257	0,68	2,313	0,76	3,166	0,83	3,955	0,88
50	0,895	0,71	1,810	0,79	2,631	0,83	3,473	0,88
60	0,663	0,74	1,456	0,79	2,194	0,83	3.031	0,88
70	0,508	0,77	1,170	0,80	1,840	0,84	2,680	0,88
80	0,400	0,79	0,955	0,82	1,555	0,84	2,358	0,88
90	0,322	0,81	0,791	0,83	1,324	0,85	2,080	0,88
100	0,265	0,82	0,650	0,83	1,136	0,86	1,841	0,89

On peut remarquer que les distances croissant en progression arithmétique, les intensités décroissent en progression géométrique dès que le rayon des surfaces polaires est supérieur 50 millimètres; ce qui n'empêche pas, comme le montre la formule générale, que la loi ne redevienne celle de la raison inverse du carré de la distance, lorsque les valeurs de a sont très-grandes par rapport à r.

Il ne faut pas non plus se méprendre sur les intensités relatives des grandes et des petites surfaces polaires : les nombres

inscrits dans les colonnes du tableau ne sont que les facteurs de m, et les valeurs absolues de m doivent changer dans un même électro-aimant, lorsqu'on y change les dimensions des surfaces polaires; il est même présumable que sous certaines conditions elles changent en raison inverse des surfaces elles-mêmes.

Le tableau précédent est encore applicable au cas où le champ magnétique est formé par deux pôles contraires mis en présence à des distances plus ou moins grandes. En effet, quand il n'y a pas de matières propres à faire écran, ces deux pôles exercent alors leurs actions individuelles comme s'ils étaient seuls, et la résultante totale ρ est égale à la somme des résultantes individuelles φ et φ' de chaque pôle. Soit donc $a+a'$ l'intervalle qui sépare les deux surfaces polaires, le point de l'axe qui sera à la distance a de la première, se trouvera à la distance a' de la deuxième, et la valeur de ρ est donnée par l'expression

$$\rho = m\left\{\frac{1}{a^2}+\frac{1}{a'^2}+2\pi\left(1-\frac{a}{\sqrt{a^2+r^2}}\right)+2\pi\left(1-\frac{a'}{\sqrt{a'^2+r^2}}\right)\right\}.$$

Le tableau suivant contient les valeurs numériques du facteur de m : il a été formé au moyen du tableau précédent en y prenant pour a' la valeur complémentaire de a pour former la distance $a+a'$ des surfaces polaires; ainsi pour $a+a'=100$ millimètres, par exemple, on a pris $a'=90$ avec $a=10$, $a'=80$ avec $a=20$, etc.

Ces nombres supposent, comme nous venons de le dire, que chacun des pôles exerce son action individuelle intégralement et sans aucune modification. Il se pourrait cependant qu'il y eût une réaction sensible de l'une des surfaces polaires sur l'autre, surtout quand ces surfaces se trouvent rapprochées à une petite distance; alors en déterminant expérimentalement les intensités du champ magnétique, on reconnaîtrait qu'elles sont plus ou moins différentes de celles qui sont rapportées dans le tableau.

Tableau des intensités du champ magnétique sur plusieurs points de l'axe pour divers diamètres et diverses distances des surfaces polaires.

DISTANCES des surfaces polaires S et S' en millimètres.	DISTANCE a à la surface S.	DISTANCE a' à la surface S'.	INTENSITÉS			
			pour $r = 30^{mm}$	pour $r = 50^{mm}$	pour $r = 70^{mm}$	pour $r = 100^{mm}$
30	10	20	7,096	9,018	9,952	10,709
40	10	30	5,863	8,148	9,203	10,136
id.	20	20	5,698	7,900	9,114	10,102
50	10	40	5,554	7,384	8,561	9,613
id.	20	30	4,365	7,000	8,365	9,529
60	10	50	5,192	6,908	8,026	9,134
id.	20	40	4,056	7,263	7,723	9,006
id.	30	30	3,132	6,100	7,616	8,956
70	10	60	4,960	6,524	7,589	8,709
id.	20	50	3,694	5,790	7,188	8,524
id.	30	40	2,823	5,363	6,974	8,433
80	10	70	4,805	6,238	7,235	8,338
id.	20	60	3,462	5,406	6,751	8,102
id.	30	50	2,461	4,890	6,439	7,951
id.	40	40	2,514	4,626	6,332	7,910
90	10	80	4,697	6,023	6,950	8,016
id.	20	70	3,307	5,120	6,397	7,731
id.	30	60	2,229	4,506	6,002	7,529
id.	40	50	2,152	4,153	5,797	7,428
100	10	90	4,619	5,859	6,719	7,738
id.	20	80	3,199	4,905	6,112	7,409
id.	30	70	2,074	4,220	5,648	7,158
id.	40	60	1,920	3,769	5,360	7,006
id.	50	50	1,790	3,680	5,262	6,946

Ce tableau montre en effet que, quand la longueur $a + a'$ du champ ne dépasse pas de beaucoup le rayon des surfaces polaires, l'intensité de la résultante est à peu près constante, pour tous les points de l'axe qui sont à plus de 10 millimètres de ces surfaces. Cependant les variations qu'elle éprouve atteignent bientôt $\frac{1}{20}$ ou même $\frac{1}{10}$ de sa valeur; il est probable que ces variations augmentent à mesure que l'on s'éloigne autour de l'axe. On peut remarquer enfin, comme il était facile de le prévoir, que le minimum de l'action correspond toujours au point de l'axe qui est à égale distance des surfaces polaires.

CHAPITRE III.

Action de la terre et des aimants sur les courants.

249. Direction des courants par l'influence du magnétisme de la terre. — Quand on eut constaté l'action des courants sur les aimants, on ne pouvait pas douter qu'il n'y eût, de la part des aimants, une réaction égale capable de diriger les courants et de les mouvoir de diverses manières. Entre tous ces phénomènes inverses des précédents, ceux qui devaient résulter de l'action magnétique de la terre se présentaient comme les plus curieux à examiner, et l'on essaya en effet de disposer des courants mobiles pour étudier les modifications qu'ils éprouveraient en les abandonnant comme des boussoles à l'influence du magnétisme terrestre. Ces premiers essais ne donnaient point de résultats satisfaisants, parce qu'il était difficile alors de donner au courant toute la mobilité désirable. Cependant Ampère parvint bientôt à lever toutes ces difficultés par un mode ingénieux de suspension qui s'applique avec avantage à tous les courants mobiles. Nous allons donner une idée de cet ajustement.

La figure 18 (Pl. 19) représente deux colonnes verticales de cuivre v et t, fixées sur un pied de bois; à leur extrémité supérieure, elles se recourbent *en potence* et viennent se terminer par les deux coupes x, y, dont les centres sont dans la même verticale; les parties de ces colonnes, qui semblent se toucher, sont séparées l'une de l'autre par des substances isolantes : ainsi, quand leur pied communique aux deux pôles de la pile par un moyen que nous allons indiquer, il est évident que les fluides électriques arrivent, l'un dans la coupe x, l'autre dans la coupe y, et qu'il n'y a point de courant produit, à moins que l'on n'établisse une communication entre ces deux coupes, que l'on peut appeler l'une la *coupe positive*, et l'autre la *coupe négative*, suivant la nature du fluide qu'elles reçoivent.

Rien ne paraît plus simple que de faire arriver l'électricité au pied des colonnes; cependant, comme il est nécessaire de changer souvent les communications, de pouvoir instantanément les supprimer ou les établir dans un ordre inverse, sans rien chan-

ger à l'appareil, Ampère a imaginé une disposition ingénieuse, qui remplit cet objet d'une manière très-commode.

r et r' (Fig. 30) sont deux rainures de quelques millimètres de profondeur, creusées dans l'épaisseur d'une plaque de bois (Fig. 30 et 31) qui peut se poser sur les tables des divers appareils électro-magnétiques; v et v', t et t' sont quatre cavités creusées de la même manière, et communiquant diagonalement par deux lames de cuivre, savoir : par ll', qui va de v en v', et par mm', qui va de t en t'; au point de croisement, ces lames sont séparées par une petite bande de substance non conductrice, afin que le courant ne puisse jamais passer de l'une à l'autre. Les deux rainures et les quatre cavités sont remplies de mercure; mais préalablement elles ont été mastiquées avec de la résine, afin que le courant ne puisse pas s'établir au travers du bois qui les sépare.

Cela posé, concevons que l'on plonge le fil positif de la pile dans la rainure r, et le fil négatif dans la rainure r'; il est évident que les fluides ne pourront passer ni dans l'une ni dans l'autre des quatre cavités v, v', t, t'; mais si l'on établit en même temps une communication de r à v, et une autre de r' à t' le fluide passera de v à v' par la lame ll', et de t à t' par la la lame mm'; ainsi la bande b' qui communique à v' sera positive, et la bande b, qui communique à t, sera négative. Au contraire, si, en reprenant les choses au premier état, on établit des communications de r à t et de r' à v', la bande b' sera négative, et la bande b positive. Or, ces deux bandes étant destinées à produire le courant, lorsqu'on les fait communiquer ensemble par un circuit métallique quelconque, il est clair que le courant traversera le circuit dans un sens ou dans l'autre, suivant que l'on mettra deux arcs conducteurs de r à v et de r' à t', ou qu'on les mettra de r à t et de r' à v'. Si maintenant on jette les yeux sur la pièce à *bascule* (Fig. 31), on verra bientôt tout le mécanisme dont il nous reste à parler. Cette pièce est de bois, et peut tourner autour de l'axe aa', qui s'ajuste dans les trous oo' sur les pieds p et p'; elle porte quatre arcs conducteurs de métal, deux d'un côté en c et c', et deux autres pareils de l'autre côté en d et d'. Quand elle est en place, les extrémités de l'arc c répondent à la rainure r et à la cavité v; celles de c', à la rainure r' et à la cavité t'; celles de d, à r et à t; celles de d', à r' et à v'; leur longueur est telle, que, dans cette

position, ils ne touchent point au mercure ; mais, quand on fait tourner la bascule pour plonger les arcs c et c', le courant passe de b' à b, et, quand on la fait tourner pour plonger les arcs d et d', le courant passe en sens inverse de b à b'.

Cet ajustement, pris dans son ensemble, s'appelle une *bascule* ou un *commutateur;* il est établi au pied des deux colonnes v et t de la figure 18; seulement, nous avons supprimé la pièce mobile, qui aurait empêché de voir les positions relatives des rainures et des cavités. On voit que les bandes b et b' de la figure 30 viennent aboutir chacune au pied de l'une des colonnes, et que c'est par elles que le fluide passe pour arriver aux coupes x et y. En faisant plonger la bascule dans un sens ou dans l'autre, on rend chacune des coupes alternativement positive et négative.

Cela posé, examinons le fil de cuivre plié en cercle de la figure 17, qui est destiné à devenir un courant circulaire mobile. Les extrémités de ce fil sont liées entre elles, mais séparées l'une de l'autre par une substance isolante ; elles sont recourbées en crosse de telle manière, qu'elles correspondent aux deux coupes x et y de la figure 18; enfin, elles portent deux pointes d'acier, l'une qui doit poser sur la lame de verre, un peu creusée, qui forme le fond des coupes, et l'autre, qui doit simplement plonger dans l'autre coupe. L'eau acidulée, ou plutôt le mercure dont on remplit les deux coupes, achève d'établir les communications, et l'on obtient ainsi un courant circulaire doué d'une grande mobilité.

Le cercle étant mis en place dans l'appareil de la figure 18, on fait passer le courant, et l'on voit à l'instant qu'il y a une force qui le sollicite; il se tourne, il oscille, et enfin il se fixe dans une position déterminée, à laquelle il revient sans cesse lorsqu'on l'en écarte. Ensuite, lorsqu'en plongeant la bascule en sens contraire, on change la direction du courant, le cercle fait une demi-révolution, vient osciller de l'autre côté, et se fixer enfin dans une position diamétralement opposée. Dans les deux cas, le plan d'équilibre où il s'arrête se trouve exactement perpendiculaire au plan du méridien magnétique. *L'équilibre stable a lieu quand, dans la partie inférieure du circuit, le courant va de l'est à l'ouest.*

Des circuits fermés, triangulaires, carrés, ou d'une autre

figure quelconque, peuvent être mis en expérience sur le même appareil (Fig. 18), et présentent les mêmes effets; ainsi, le rectangle de la figure 16 se dirige comme le cercle précédent.

Pour que l'action de la terre se neutralise par elle-même dans un lieu quelconque, il suffit d'ajuster les fils pour avoir, de part et d'autre de l'axe de rotation, des parties symétriques que le courant traverse dans le *même sens;* par exemple, la figure 15 représente un rectangle qui n'a aucune force directrice; en effet, il est facile de voir, en suivant la direction du courant de la figure, qu'il y a toujours de part et d'autre de l'axe des forces égales qui se détruisent mutuellement, puisqu'elles tendent à produire une rotation dans le même sens.

250. Direction des courants verticaux par l'influence de la terre. — Les phénomènes précédents ont été analysés pour la première fois dans un mémoire que je présentai à l'Institut sur ce sujet. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXI, p. 77.) M. Aug. de La Rive avait fait, de son côté, des recherches analogues dont il donna connaissance, très-peu de temps après, à la Société d'Histoire naturelle de Genève. (*Bibliothèque universelle*, t. XXI, p. 21.) Pour bien se rendre compte de l'action de la terre, il faut examiner ses effets sur les courants verticaux et sur les courants horizontaux. Voici d'abord l'appareil qui m'a servi à ces recherches pour les courants verticaux. Il se compose de deux vases cylindriques de cuivre, l'un supérieur et l'autre inférieur, d'un diamètre un peu plus grand (Fig. 26). Ces vases sont percés en leur milieu d'une ouverture un peu large, pareillement cylindrique, dans laquelle passe la tige *t*, qui se termine par la coupe *c*; la traverse *hh'* est de substance non conductrice; elle porte en son milieu une pointe par laquelle elle repose en équilibre sur le fond de la coupe *c*, remplie de mercure. Les fils *v* et *v'* attachés à la traverse sont recourbés, pour plonger par une extrémité dans l'eau acidulée du vase supérieur et par l'autre dans l'eau acidulée du vase inférieur; une petite languette en métal soudée sur le fond du premier vase, plonge dans le mercure de la coupe, pour établir une communication entre l'eau et la tige. Ainsi, le courant qui entre par le vase inférieur passe dans l'eau acidulée du vase inférieur, dans les fils verticaux, dans l'eau acidulée du vase supérieur, dans la languette, dans la coupe, et vient enfin descendre par la tige *t*.

Lorsqu'on relève l'extrémité inférieure ou supérieure de l'un des fils pour le faire sortir de l'eau acidulée, de manière que le courant passe seulement par l'autre fil, le système se dirige et vient se placer dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique : *quand le courant est ascendant, le fil qu'il traverse se place à l'occident*, ou du moins, s'il vient à l'orient, il n'y trouve qu'une position d'équilibre instable, dont la moindre force peut le déranger ; c'est le contraire quand le courant est descendant.

On voit par cette raison que les deux fils pris ensemble, s'ils sont bien égaux, diamétralement opposés, placés à la même distance de l'axe, et traversés par des courants de même intensité, doivent former un système complétement indifférent à l'action de la terre, puisque, dans toutes les positions autour de l'axe, les deux fils sont alors sollicités par des forces parallèles égales et dirigées dans le même sens, qui ne cessent pas de se faire équilibre. Mais il n'en est pas de même lorsque les deux fils ne sont pas diamétralement opposés, ou lorsqu'il existe entre eux quelque légère différence de diamètre, de forme, de longueur, de distance à l'axe, ou de faculté conductrice qui entraîne quelque inégalité dans les moments de rotation. On peut, en variant ces diverses circonstances, faire un grand nombre d'expériences intéressantes. Pour que l'équilibre soit plus stable, on peut, sans modifier en rien les résultats, joindre les extrémités inférieures des fils par un ruban de cuivre formant un cercle parallèle aux bords du vase.

251. Rotation des courants horizontaux par l'influence de la terre. — L'appareil qui sert à étudier l'action des courants horizontaux est représenté dans les figures 19, 20 en coupe et en plan ; c'est un simple vase de cuivre analogue aux précédents. Le fil horizontal *ab*, terminé par les boules *c* et *d*, est en équilibre stable sur sa pointe, qui repose dans la coupe centrale, et deux appendices verticaux très-courts plongent dans l'eau acidulée du vase. Le courant qui entre, par exemple, par la coupe, traverse en sens opposé les deux moitiés du fil pour passer dans l'eau acidulée, et de là dans le métal du vase, et l'on aperçoit aussitôt un mouvement de rotation continu. La rotation se fait de l'est à l'ouest par le nord quand le courant va du centre à la circonférence, et en sens contraire quand le courant va de la circonférence au centre du fil.

Le phénomène se produit encore, quoique avec moins d'intensité, quand le courant ne passe que par l'une des moitiés du fil, l'autre moitié étant de substance non conductrice, ou cessant de plonger dans l'eau acidulée.

Mais il est évident qu'il n'y aurait plus aucun mouvement dans un fil horizontal composé de deux parties égales, et traversées par le même courant, comme le représente la figure 21, quel que soit d'ailleurs l'angle des deux parties *ac* et *bc;* car, dans l'une, le courant marche de la circonférence au centre *c*, et dans l'autre, du centre à la circonférence, en sorte qu'elles tendent à tourner en sens contraire, et composent un système indifférent. Ce système toutefois tendrait à se transporter dans un sens ou dans l'autre, en suivant la direction de la ligne qui divise l'angle *acb* en deux parties égales.

D'après cette analyse des actions éprouvées de la part de la terre par les courants verticaux et horizontaux, il est facile de voir que, si le système représenté dans la figure 27 tourne d'un mouvement continu lorsqu'on l'ajuste sur l'appareil de la figure 26, c'est par l'effet de ses branches horizontales, et nullement par l'effet de ses branches verticales qui composent un système indifférent.

252. Direction des courants par les aimants. — Ce que nous avons dit sur la direction que le magnétisme de la terre imprime aux courants mobiles suffit pour indiquer la plupart des effets qui seront produits par l'action des aimants; mais, comme la terre agit sans cesse, il faudra, pour ne pas compliquer les expériences, employer des appareils dans lesquels son influence se détruise d'elle-même. Par exemple, le double rectangle de la figure 15 étant suspendu dans l'appareil de la figure 18, on verra qu'il reste en équilibre dans toutes les positions, et, en approchant l'un des pôles d'un aimant, il sera facile de l'attirer, de le repousser, et de lui imprimer des mouvements dans tous les sens. Lorsqu'on fait ces expériences, on est frappé d'abord des alternatives d'attraction et de répulsion qui se manifestent pour des positions de l'aimant très-peu différentes. En portant l'un de ses pôles un peu plus à droite ou un peu plus à gauche, en l'approchant ou en l'éloignant d'une quantité très-petite, on observe à l'instant un renversement dans l'action. Tous ces mouvements, si divers et si compliqués en apparence, se déduisent du principe général que nous avons énoncé (**245**). Pour les expli-

quer, il suffit d'analyser les couples différents qui résultent de l'action de chaque pôle sur les diverses parties du courant, et d'observer en même temps la disposition de ces forces par rapport à l'axe de rotation, et les bras de leviers par lesquels elles agissent ; c'est un problème dont les conditions peuvent être variées à l'infini.

On doit à M. de La Rive plusieurs expériences ingénieuses par lesquelles il fait voir que des courants très-faibles peuvent être dirigés par les aimants, ou même par l'action magnétique de la terre. Ces petits appareils sont des courants flottants, dont on peut varier la forme à volonté (Fig. 29). Dans un morceau de liége, destiné à flotter sur un large vase d'eau acidulée, on fait passer une petite feuille de zinc *z*, qui est soudée en *s* à un ruban ou à un fil de cuivre *c;* après avoir décrit une circonférence dans la figure 29, ce fil de cuivre vient à son tour passer dans le liége, et plonger dans l'eau acidulée à une petite distance de la feuille de zinc. Dès que l'appareil est sur l'eau, le courant s'établit dans la direction des flèches, et il est assez sensible pour être dirigé par la terre, et à plus forte raison pour être attiré ou repoussé par les aimants. Par exemple, lorsqu'on présente le pôle boréal d'un aimant au cercle de la figure 29, à une certaine distance, on le voit se tourner sur lui-même d'une certaine manière, puis s'avancer vers le pôle, s'engager sur l'aimant, arriver jusqu'au milieu et, là, s'arrêter après diverses oscillations. Si l'on avance ou si l'on recule l'aimant, le cercle avance ou recule pour garder sa position, qui est en effet la seule, comme on peut le voir aisément, dans laquelle il se trouve en équilibre stable.

253. Rotation des courants par les aimants. — Avec le pôle d'un aimant convenablement disposé relativement au courant horizontal de la figure 19, on peut produire à volonté tous les phénomènes qui résulteraient de l'action magnétique de la terre dans tous les climats, depuis l'équateur jusqu'aux pôles.

1° Le pôle boréal d'un barreau étant présenté *au-dessous* de l'appareil et agissant ainsi dans le même sens que le magnétisme terrestre, on observe une grande accélération de vitesse dans la rotation.

2° Le même pôle étant au contraire présenté *au-dessus* de l'appareil, son action est inverse de celle de la terre, et l'on peut, en variant les distances, faire tour à tour prédominer la force de l'aimant ou celle du globe terrestre.

3° Le pôle austral de l'aimant agit toujours en sens contraire

du pôle boréal; et, comme l'action de chacun des pôles détermine des rotations opposées, en passant au-dessus ou au-dessous du plan horizontal *ab*, il est évident que, dans ce plan lui-même, l'action de chacun est exactement nulle. On peut ainsi faire avec cet appareil un grand nombre d'expériences, dont il sera facile d'expliquer toutes les particularités.

Les expériences que l'on peut faire avec les courants verticaux, ascendants ou descendants de la figure 26, ne sont ni moins nombreuses, ni moins variées, ni moins faciles à expliquer. Par exemple, il est évident que les deux courants diamétralement opposés, qui forment un système indifférent sous l'influence du magnétisme terrestre, forment au contraire un système capable de recevoir un mouvement de rotation très-rapide sous l'action de l'un des poles d'un aimant. Concevons, en effet, le cylindre indéfini que décrivent en tournant les deux fils verticaux *v v'* et leurs prolongements : lorsqu'un pôle austral sera placé quelque part dans l'intérieur de ce cylindre, soit au-dessus, soit au-dessous des courants, il produira partout une rotation continue dans un sens ou dans l'autre, suivant que le courant sera ascendant ou descendant. Un pôle boréal placé seul produira aussi le même phénomène, toujours en sens inverse, de telle sorte qu'on n'aurait plus de rotation si ces deux pôles contraires agissaient en même temps dans des positions où leur énergie fût égale.

Placés au dehors du cylindre indéfini dont nous venons de parler, les pôles d'un aimant ne peuvent plus produire de rotation, mais ils impriment simplement au système mobile une direction déterminée.

Les appareils des figures 26 et 19 participent à la fois aux propriétés des branches horizontales et à celles des branches verticales, et ils éprouveront, de la part des aimants, des effets composés dont il sera facile de faire l'analyse.

On doit à M. Faraday un appareil très-simple, au moyen duquel on produit aisément le phénomène de la rotation continue; il est représenté dans la figure 28 : *zz'* est un vase de zinc, percé en son milieu, et portant une petite traverse sur laquelle est soudée en *s* une tige de cuivre *sc*; dans la coupe qui termine cette tige, on met en équilibre l'appareil de la figure 27; le mercure de la coupe et l'eau acidulée du vase, dans laquelle plonge le ruban circulaire, complètent les communications, et le courant mobile se met à tourner rapidement sous l'influence des barreaux

qui sont placés en *a* au-dessous du vase. On peut même donner à cet appareil assez de sensibilité pour qu'il tourne sous l'influence de la terre.

Le courant est ici produit par l'action chimique que l'eau acidulée exerce sur le zinc du vase.

254. **De quelques phénomènes que présentent les courants qui passent dans les liquides.** — C'est à sir H. Davy que l'on doit la première observation de ces phénomènes, il les produisit au moyen de la grande pile de la Société royale; nous rapporterons ici deux de ses expériences les plus remarquables.

Premièrement. On met au fond d'une soucoupe ou d'un large vase de verre une masse de mercure assez considérable, sur laquelle on verse une couche d'eau acidulée; les deux pôles d'une pile viennent plonger verticalement dans le mercure en deux points qui soient à peu près à égale distance du centre et de la circonférence. Le courant, une fois établi de cette manière, on n'observe aucun phénomène particulier; mais, dès qu'on approche l'un des pôles d'un puissant aimant, le mercure semble d'abord agité et tournoyant, et bientôt après toute la masse se met en mouvement de rotation très-rapide, autour de chaque fil, comme autour d'un axe : la direction de ces mouvements est déterminée par celle du courant, par la position et par la nature du pôle magnétique qu'on lui présente. L'action est plus vive lorsqu'on fait agir deux pôles contraires d'un aimant, l'un au-dessus, l'autre au-dessous du mercure, et hors de l'espace qui est compris entre les fils.

Secondement. On fait passer, par le fond d'un large vase de verre, deux gros fils de cuivre qui sont partout enduits de cire, excepté à leur extrémité supérieure, et qui s'élèvent perpendiculairement jusqu'à un pouce environ au-dessus du fond. Ces deux fils sont à trois pouces l'un de l'autre. Le vase étant rempli de mercure, de manière que le niveau s'élève à une ou deux lignes au-dessus des fils, on fait passer un courant très-énergique. Alors on observe les phénomènes suivants : le mercure est fortement agité, sa surface au-dessus de chaque fil s'élève en forme de petits cônes d'où s'échappent de petites ondes dans toutes les directions; le seul point sans agitation paraît être celui de la rencontre de ces ondes au centre du mercure entre les deux fils. Ensuite, lorsqu'on approche graduellement au-dessus de l'un de ces cônes le pôle d'un barreau fortement aimanté, son sommet s'affaisse

peu à peu, et enfin il retombe au niveau, et même, à une moindre distance, le barreau détermine une dépression du mercure et une espèce d'entonnoir mobile et tourbillonnant, dont le sommet descend presque jusqu'à l'extrémité du fil.

L'étain en fusion présente le même phénomène.

M. Jamin a produit des effets analogues aux précédents, dans le liquide du voltamètre, avec une batterie de 10 éléments de Bunsen ; alors les fines bulles de gaz qui s'élèvent sont entraînées par le liquide et indiquent ainsi les mouvements qu'il reçoit autour de chaque électrode. Le voltamètre doit être un cylindre de verre, de quelques centimètres de hauteur et à base plane : tantôt les électrodes traversent cette base pour s'élever seulement de quelques millimètres dans la masse liquide ; tantôt ils pénètrent par la partie supérieure, et s'ajustent horizontalement ou verticalement, à des distances différentes; mais, dans ce cas, il faut avoir soin de couvrir de gutta-percha les portions des électrodes qui ne doivent pas donner passage au courant. Les électro-aimants sont disposés d'après les effets que l'on veut obtenir : on peut les mettre tout deux sous la base du voltamètre. où, l'un au-dessous, l'autre au-dessus, et près de la surface liquide. Les mouvements se diversifient d'après les positions relatives de la ligne des pôles et de celle des électrodes. M. Jamin. après avoir analysé ces phénomènes variés, démontre qu'ils doivent leur origine à la résultante des forces que les pôles magnétiques exercent sur les ramifications du courant dans le sein de la masse liquide (*Ann. de ch. et de phys.*, mars 1855; t. XLIII. p. 334.)

CHAPITRE IV.

De l'action des courants sur les courants.

255. C'est à Ampère que l'on doit la découverte de l'action mutuelle que les courants exercent sur les courants, et c'est presque uniquement à ses recherches que l'on doit en même temps la connaissance non moins importante des lois mathématiques qui les enchaînent. La théorie générale à laquelle il est parvenu, et qu'il a exposée dans l'un des ouvrages les plus remarquables de notre époque (*Théorie des phénomènes électro-dynamiques*, etc. Paris, 1826), n'embrasse pas seulement l'action des courants proprement dits, mais elle s'étend encore aux actions magnétiques elles-mêmes et aux actions mutuelles des courants et des aimants; elle ramène par conséquent à un même principe des phénomènes qui avaient jusqu'alors été considérés comme dépendants de forces différentes. Pour atteindre ce but, Ampère a a été obligé, il est vrai, de recourir à des considérations hypothétiques sur la constitution des aimants; mais ses hypothèses sont dans l'ordre de celles que les géomètres doivent admettre pour appliquer le calcul aux phénomènes physiques; elles semblent d'ailleurs avoir reçu un nouveau degré de probabilité par les découvertes dont elles ont été suivies.

Nous regrettons vivement que le cadre d'un traité élémentaire ne nous permette pas d'exposer cette théorie dans son ensemble, mais nous nous attacherons du moins à faire connaître toutes les principales expériences qui lui servent de base, en substituant, autant qu'il nous sera possible, un ordre logique à l'ordre mathématique adopté en dernier lieu par Ampère, et en simplifiant les appareils pour les rendre plus intelligibles.

256. Action des courants parallèles. — Deux courants parallèles ne peuvent pas être en présence sans exercer l'un sur l'autre une action plus ou moins vive, qui dépend de leur distance, de leur intensité et de leur longueur; en ne considérant cette action que par rapport à la direction des effets, elle est soumise à cette loi générale très-simple : *Deux courants paral-*

lèles s'attirent quand ils marchent dans le même sens, et ils se repoussent quand ils marchent en sens contraire.

C'est ce que nous allons démontrer au moyen de l'appareil suivant :

abcdef (Pl. 19. Fig. 22) est un fil de cuivre plié en rectangle, dont les extrémités s'adaptent dans les deux coupes *x* et *y* qui terminent les deux colonnes *t* et *v*; lorsque ce rectangle est en place, le courant qui entre par la colonne *t* le parcourt dans le sens des flèches pour sortir par la colonne *v*; alors les courants de *t* et de *de* marchent dans le même sens en montant, ceux de *v* et de *bc* marchent dans le même sens en descendant, et il y a une vive attraction qui ramène sans cesse le rectangle dans la position où le côté *de* est près de *t*, et le côté *bc* près de *v*; donc *les courants qui vont dans le même sens s'attirent.*

En substituant le rectangle de la figure 23 à celui de la figure 22, on a, dans ce rectangle et dans les colonnes, des courants qui marchent en sens contraire, et l'on observe une répulsion ; donc *les courants qui vont en sens contraire se repoussent.*

Dans ces expériences, il faut disposer les appareils pour que le mouvement du rectangle ne puisse pas être attribué à l'action de la terre à laquelle il se trouve soumis, comme nous l'avons vu précédemment.

L'intensité de ces attractions et de ces répulsions est évidemment proportionnelle à la longueur des côtés verticaux du rectangle, et au carré de l'intensité du courant qui est en circulation dans l'appareil ; elle serait aussi en raison inverse de la simple distance, si les colonnes *t* et *v* pouvaient être considérées comme ayant une longueur infinie par rapport à la longueur des courants mobiles sur lesquels elles agissent.

Lorsqu'un fil est replié sur lui-même (Fig. 24) de manière à donner passage à deux courants égaux et contraires, son effet attractif ou répulsif est évidemment nul, car les actions qu'il exerce, soit sur des aimants, soit sur des courants, se détruisent toujours comme étant toujours égales et opposées.

257. Action des courants sinueux. — L'action d'un courant sinueux quelconque est équivalente à celle d'un courant linéaire de même longueur et de même intensité, pourvu toutefois que ces actions s'exercent à une distance très-grande par rapport à l'amplitude des sinuosités. C'est ce que l'on démontre au moyen de la colonne de la figure 25, qui est composée d'une lame de

métal et d'un fil de cuivre couvert de soie, communiquant à son sommet et descendant sinueusement comme le représente la figure. Cette lame peut être placée à quelque distance de la colonne *v*, et alors, quand le courant est descendu par cette colonne, on le fait remonter par la lame pour qu'il redescende par le fil; et l'on n'aperçoit pas que ce système exerce la moindre action sur le rectangle mobile dont il est très-voisin. Ainsi, la lame et le fil sinueux représentent simplement un courant ascendant et un courant descendant dont les effets se détruisent; donc l'action du fil sinueux est seulement équivalente à celle de la lame.

Il en résulte que l'on peut toujours remplacer un courant curviligne d'une petite étendue, ou par sa corde ou par ses deux projections faisant entre elles un angle quelconque. Si le fil sinueux de l'expérience précédente était roulé en spirale, son effet sur le rectangle serait encore égal à celui du courant linéaire ; cependant il n'en faudrait pas conclure qu'une spirale pût toujours être remplacée par un fil, mais seulement que, dans le cas dont il s'agit, sa résultante est la même.

258. Action des courants croisés. — Nous appelons courants *croisés* ceux qui ne sont point parallèles, soit qu'ils se trouvent dans le même plan, et que leurs directions puissent se rencontrer, soit qu'ils se trouvent dans des plans différents, et que leurs directions ne puissent pas se rencontrer : dans le premier cas, le *point de croisement* est le point de rencontre; dans le second cas, c'est l'un des points de la plus courte distance des deux courants. *Deux courants croisés tendent toujours à devenir parallèles pour marcher dans le même sens*, ou, en d'autres termes, *il y a attraction entre les parties qui vont l'une et l'autre en s'approchant, ou l'une et l'autre en s'éloignant du point de croisement, et répulsion entre les parties qui vont, l'une en s'éloignant, et l'autre en s'approchant de ce même point.*

Ainsi, *ab* et *cd* (Pl. 20, Fig. 1) étant deux courants dont le point de croisement est en *r*, il y a attraction entre les deux parties *ar* et *cr* parce qu'elles s'approchent de *r*, et entre les parties *br* et *rd* parce qu'elles s'en éloignent : mais il y a répulsion entre *ar* et *rd* parce que l'une s'approche et l'autre s'éloigne de *r*, et répulsion pareille entre *cr* et *rb* par la même raison.

L'appareil des figures 2 et 3 sert à démontrer cette proposition. Dans un disque de bois on a creusé deux rigoles semi-

circulaires, séparées par les cloisons non conductrices *a* et *b* (Fig. 3); au centre s'élève un pivot sur lequel repose une aiguille de cuivre *cd* très-mobile, dont les bouts recourbés sont en fer et plongent dans le mercure des rigoles; un peu au-dessous de cette aiguille s'en trouve une autre *ef*, que l'on fait marcher avec la main, et dont les extrémités plongent aussi dans le mercure des rigoles; le courant qui entre par la coupe *x*, passe par les deux aiguilles et va ressortir par la coupe *y*. On montre la répulsion en mettant les aiguilles dans les positions *cd* et *ef* (Fig. 3), et l'attraction en les mettant dans une autre position quelconque où l'angle *crf* soit moindre qu'un angle droit.

Il en résulte qu'un courant angulaire *abc* (Fig. 4) tend à se redresser, car les parties *ab* et *bc* se repoussent.

Cette répulsion ne tend pas seulement à ramener *bc* dans le prolongement de *ab;* mais elle s'exerce encore quand cette condition est remplie, c'est-à-dire *que les portions contiguës d'un même courant rectiligne se repoussent.* Cette conséquence, qui est importante dans la théorie d'Ampère, ne me paraît pas cependant démontrée d'une manière complétement satisfaisante. Voici l'appareil dont on se sert : un vase rempli de mercure est séparé en deux parties par une cloison non conductrice *ab* (Fig. 5), un fil de cuivre couvert de soie est replié pour passer d'un compartiment à l'autre, en présentant dans chaque compartiment une branche horizontale parallèle à la cloison; cette branche est revêtue de cire, excepté à son extrémité, où elle se recourbe un peu pour plonger dans le mercure. En faisant arriver les deux pôles de la pile dans le prolongement des deux branches du fil, on voit le fil entier qui recule, et qui semble annoncer une répulsion entre la partie du courant qui pénètre dans le fil et celle qui est encore dans le mercure. Mais l'on ne connaît pas assez le mode suivant lequel un courant passe d'un liquide dans un solide, pour que cette conséquence soit tout à fait rigoureuse; il suffirait, par exemple, qu'une portion du courant se présentât obliquement au fil, pour qu'une certaine répulsion dût avoir lieu.

259. Rotation d'un courant par l'action d'un courant. — Concevons un courant fixe indéfini *ab* (Fig. 6), et un courant *cd*, mobile parallèlement à lui-même : le point de croisement étant en *r*, il y aura attraction dans l'angle *brd* entre les parties *rb* et *cd* qui vont l'une et l'autre en s'éloignant du sommet de l'angle

ou du point de croisement : il y aura, au contraire, répulsion dans l'angle *ard*, parce que la partie *ar* s'approche, tandis que la partie *cd* s'éloigne ; ces deux forces donnent naissance à une résultante parallèle à *ab* qui tend à pousser incessamment le courant *cd* de *a* vers *b*.

Si le courant fixe *ab* est replié en cercle, il est évident alors que *cd* devra tourner indéfiniment en vertu de la même action.

C'est ce que l'on réalise dans l'appareil représenté par la figure 7.

azsb (Fig. 7) est un ruban de cuivre couvert de soie, plié en hélice et adapté autour du vase de cuivre *v*; *ci* est un conducteur communiquant au pied de la colonne à coupe *p* qui porte le fil *m*, et *d* communique au vase *v*. Si l'on met le pôle positif de la pile en *a* et le pôle négatif en *d*, après avoir établi une communication de *b* en *c*, et rempli le vase *v* d'eau acidulée, on a un courant qui marche dans l'hélice de *z* en *s* en faisant le tour du vase, et qui descend dans les branches verticales du fil, et celui-ci se met à tourner suivant *zis* : si au contraire on met le pôle positif de la pile en *b* et le pôle négatif toujours en *d*, après avoir établi une communication de *a* en *c*, alors le courant marche dans l'hélice de *s* en *z* en faisant le tour du vase ; il est toujours descendant dans les branches verticales du fil, qui tourne alors en sens contraire, c'est-à-dire suivant *siz*. Ce renversement suffit pour montrer que la rotation n'est pas due à l'action de la terre, car, le courant étant toujours descendant dans le fil, la terre le ferait toujours tourner dans le même sens.

On doit à Savary une autre conséquence du même principe : lorsque dans un vase de cuivre analogue au précédent, mais sans hélice, on dispose l'appareil de la figure 8, on observe aussi une rotation continue qui s'explique de la manière suivante : la branche verticale *n* du fil étant non conductrice, le courant descend seulement par la branche *l*, et parcourt le ruban de cuivre dans le sens *abc*, parce que ce ruban est interrompu de *c* en *a* par une lame d'ivoire; du ruban le courant se dirige soit aux bords, soit au fond du vase, en traversant le liquide, et, ces courants partiels du liquide pouvant être considérés comme fixes par rapport au ruban mobile, on voit que celui-ci doit tourner dans le sens *cba*, et qu'il tournerait encore dans le même sens si le courant passait du liquide au ruban au lieu de passer du ruban au liquide. Pour renverser le sens de rotation, il faudrait

interrompre le ruban à gauche de sa jonction avec *l*, au lieu de l'interrompre à droite ; c'est ce qui est en effet confirmé par l'expérience. Mais, quand le ruban est continu, comme dans l'appareil de la figure 7, les courants du liquide cessent d'avoir de l'influence, ou plutôt leurs influences se détruisent parce qu'il est facile de voir qu'elles sont égales et opposées.

Théorie du magnétisme et de l'action mutuelle des aimants et des courants, en considérant les aimants comme des assemblages de courants.

260. Le principe de cette théorie consiste à regarder chaque molécule d'un aimant comme enveloppée par un courant particulier qui se meut sans cesse, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de la molécule, formant ainsi un circuit fermé et rentrant sur lui-même, auquel, pour plus de simplicité, on peut attribuer la forme circulaire. D'après cela, si l'on conçoit dans un barreau cylindrique une simple file de molécules parallèle à l'axe, leur ensemble formera le système représenté dans la figure 9 ; toutes les autres files parallèles donnant naissance à des systèmes analogues, le barreau ne sera qu'un faisceau composé d'une infinité de systèmes pareils ; mais il est évident que tous les circuits élémentaires contenus dans une même section perpendiculaire à l'axe pourront toujours être représentés par un seul circuit qui en sera la résultante, et qu'en dernier résultat le barreau aimanté pourra être considéré comme un simple assemblage de courants circulaires, marchant tous dans le même sens et contenus dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe du barreau, ayant de plus leurs centres sur cet axe lui-même quand l'aimantation est régulière.

Ce que nous venons de dire d'un barreau cylindrique peut s'appliquer à une aiguille, ou en général à un aimant de forme quelconque : il suffira toujours de considérer l'axe magnétique, et, autour de cet axe, des courants circulaires de grandeur finie perpendiculaires à sa direction et marchant dans le même sens.

D'après cela, il est facile d'imiter les aimants, sinon avec exactitude du moins avec une approximation plus ou moins grande : car il suffit de prendre un fil de métal couvert de soie et d'y faire passer un courant après l'avoir roulé, comme le représente

la figure 10, pl. 20, en cercles séparés par des portions droites. Ces systèmes de courants s'appellent *cylindres électro-dynamiques*, ou *solénoïdes ;* il y a toutefois quelque différence entre les solénoïdes et les aimants, parce que les cercles des solénoïdes ne sont pas tout à fait fermés, parce qu'ils communiquent entre eux, et parce que c'est le même courant qui les traverse. Mais ces différences ne peuvent point empêcher l'analogie générale des effets : d'ailleurs, il suffit de replier le fil comme on le voit dans la figure 10, pour neutraliser l'effet de la portion droite du fil qui unit les différents cercles, puisque alors dans cette ligne il y aura des courants égaux et contraires.

Un fil roulé en hélice (Fig. 11) ne diffère en rien du solénoïde précédent, et le fil droit replié dans l'axe neutralise pareillement l'effet de l'obliquité de chaque tour de spire.

Pour représenter tous les phénomènes d'une aiguille ou d'un aimant donné, il ne faudrait pas sans doute rouler toujours le fil sur un cylindre, mais le plus souvent il faudrait le rouler ou sur des cônes opposés (Fig. 12), ou sur des moules d'une autre forme qui ne serait même pas une surface de révolution.

Dans l'hypothèse dont il s'agit, le globe de la terre doit être aussi considéré comme sillonné par des courants intérieurs parallèles à l'équateur magnétique ; mais dans chaque lieu on pourra toujours concevoir que l'ensemble des actions de tous ces courants se réduise à l'action d'un seul courant hypothétique auquel on devra par conséquent attribuer une intensité et une position convenables pour représenter l'ensemble des effets. Nous appellerons ce courant, le *courant moyen de la terre :* sur l'équateur magnétique, le courant moyen est dans un plan vertical, mais, dans tous les autres lieux, il est plus ou moins incliné. Nous allons voir d'abord comment on peut déterminer sa direction et sa position.

261. Direction du courant terrestre. — Il est facile de démontrer que *le courant moyen de la terre est dirigé de l'est à l'ouest :* en effet, la partie la plus efficace de ce courant étant sensiblement horizontale dans chaque lieu, il suffit de soumettre à son action un courant vertical, mobile autour d'un axe pareillement vertical, et d'observer ses positions d'équilibre. Or, nous avons constaté précédemment (**250**) que, sous l'action de la terre, un tel courant mobile se dirige toujours perpendiculairement au plan du méridien magnétique, et qu'il s'arrête à l'*est* quand il est

descendant, et à l'*ouest* quand il est *ascendant*. Donc le courant terrestre est lui-même perpendiculaire au plan du méridien magnétique, et marche de l'est à l'ouest. Cependant cette expérience, qui donne aisément la direction du courant terrestre, ne décide rien sur sa position; il peut passer au lieu même de l'observation, ou au nord ou au midi, comme on le voit dans la figure 13 : s'il était par exemple au midi en *cd*, il produirait le même résultat; car, *g* étant la projection de l'axe de rotation, et *hik* la circonférence que peut décrire le courant mobile que nous supposerons ascendant, il est clair que ce courant mobile étant en *h*, il serait repoussé par le courant terrestre *dr* qui s'approche du point de croisement, tandis que lui s'en éloigne, et qu'il serait au coutraire attiré par *cr* qui s'éloigne comme lui du point de croisement; en vertu de cette double force il marcherait donc vers le point *i*, qui serait sa seule position d'équilibre. On ferait le même raisonnement sur le courant *ef*, qui est au nord du lieu de l'observation.

262. Position du courant terrestre. Dans chaque lieu, le courant terrestre est dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison. — Pour le démontrer, il suffit de remarquer que, quand un courant rectangulaire *abcdef* (Fig. 14) est bien équilibré autour de son axe de rotation, et qu'il n'est sollicité que par un seul courant *gh* parallèle à cet axe, il faut, pour la stabilité de l'équilibre, 1° que son plan coïncide avec le plan déterminé par l'axe et par le courant; 2° qu'il marche parallèlement au courant dans son côté qui en est le plus près. Cette conséquence, qui est indépendante de la direction de l'axe de rotation, s'applique évidemment au cas où cet axe serait horizontal, ainsi que le courant qui sollicite le rectangle. Par conséquent, si l'on dirige l'appareil de la figure 15 de manière que l'axe de rotation soit parallèle au courant terrestre, c'est-à-dire, d'après ce que nous venons de voir, perpendiculaire au méridien magnétique, il est clair que le plan dans lequel le courant rectangulaire se mettra en équilibre, sera rigoureusement le plan dans lequel se trouve le courant terrestre. Or, en faisant l'expérience, on trouve que le plan d'équilibre est perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison.

Ce résultat, qu'il est difficile de rendre parfaitement rigoureux, à cause des frottements, se trouve, au reste, confirmé par l'ensemble des observations.

Un courant circulaire ou d'une autre forme présenterait les mêmes effets.

Après avoir constaté la direction et la position du courant moyen de la terre, nous allons appliquer la théorie à l'explication des différents phénomènes.

Action de la terre sur les courants.

263. Direction des courants fermés. — Les côtés horizontaux du rectangle de la figure 16, pl. 20, étant traversés par des courants contraires, ne peuvent rien éprouver de la part du courant terrestre, dont ils sont également éloignés. L'appareil se réduit donc aux deux côtés verticaux qui doivent se porter l'un à l'est et l'autre à l'ouest, comme nous venons de le voir. Aussi le rectangle doit se placer perpendiculairement au méridien magnétique, et avoir son équilibre stable quand le côté descendant est à l'est, et le côté ascendant à l'ouest ; c'est, en effet, ce que nous avons observé (**249**).

La même explication s'applique au cercle de la figure 17, dont chaque quadran peut, à l'égard de l'action terrestre, être représenté par ses projections horizontales et verticales, en sorte qu'il se transforme en un rectangle.

Il en serait de même de tout autre circuit fermé, contenu dans un plan vertical et mobile autour d'un axe vertical.

Rotation des courants horizontaux. — Le courant horizontal *ab*, mobile autour du point *a*, étant sollicité par le courant terrestre, qui est lui-même horizontal, placé au-dessous de lui et vers le sud, comme le représente la figure 18, doit tourner dans le sens *bcdf*, quand le courant marche de la circonférence au centre, et dans le sens *bfdc* quand le courant va au contraire du centre à la circonférence. En effet, dans la position *ab*, les courants de l'appareil et de la terre étant parallèles, et marchant dans le même sens, il y a une attraction qui tend à amener le point *b* en *c*. Dans cette position, *ro* repousse *ca*, et *rh* l'attire ; il doit donc continuer sa route jusqu'en *d;* là il y a répulsion entre les courants parallèles et opposés, et en *f* il y a attraction de *ro*, répulsion de *rh;* ainsi le courant *ab* doit prendre son mouvement continu, comme nous l'avons observé.

Action de la terre sur les aimants.

264. Déclinaison. — Puisqu'un courant circulaire fermé se

dirige perpendiculairement au méridien magnétique, il en résulte qu'un assemblage d'un nombre quelconque de cercles parallèles entre eux, et traversés par des courants marchant dans le même sens, doit se placer dans la même direction. Or, un tel assemblage n'est autre chose qu'un solénoïde ; donc un solénoïde horizontal doit se tourner de manière que son axe soit dans la direction de l'aiguille de déclinaison, le courant ascendant étant à l'ouest. C'est ce que l'on vérifie, en effet, au moyen du solénoide de la figure 19, pl. 20, qui s'adapte à l'appareil (Pl. 19, Fig. 18).

Il en résulte que non-seulement l'aiguille de déclinaison peut être assimilée à un solénoïde, mais que le pôle *austral* des aimants, c'est-à-dire celui qui se dirige vers le nord, est celui pour lequel le côté ascendant se trouve *à droite* quand on le regarde en face *par le bout;* ou celui dont le courant marche en sens contraire de l'aiguille d'une montre; tandis que le pôle *boréal*, vu par le bout, est produit par un courant qui tourne comme l'aiguille d'une montre.

Inclinaison. — Puisqu'un courant fermé, mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique, se dirige dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, il est évident qu'un solénoïde bien équilibré dont l'axe de figure serait mobile dans le méridien magnétique, se mettrait en équilibre en prenant rigoureusement la direction de l'aiguille d'inclinaison. Il serait difficile, sans doute, de faire des solénoïdes assez mobiles pour vérifier ce résultat par une expérience directe, mais il suffit de l'approximation que l'on peut obtenir au moyen de l'appareil (Pl. 20, Fig. 15) pour montrer que, même dans l'inclinaison, l'aiguille aimantée se comporte comme un véritable solénoïde.

Variations diurnes et perturbations. — Dans la théorie ordinaire du magnétisme, on ne peut expliquer ces phénomènes qu'en admettant des modifications particulières dans l'état du magnétisme terrestre, et l'on comprend qu'il n'y a pas plus de difficulté d'attribuer ces modifications à un changement dans le courant électrique qu'à un changement dans la distribution magnétique.

Action mutuelle des aimants et des courants.

265. Direction des aimants par les courants. — Nous avons résumé les divers effets de l'action primitive observée par

Œrsted, en disant que *le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui*, *le pôle austral à gauche* (**243**). Essayons de voir comment ce fait général peut maintenant s'expliquer, en regardant l'aimant comme un solénoïde. Or, si nous concevons un courant vertical fixe et ascendant *ab* (Pl. 20, Fig. 20) et un courant rectangulaire mobile autour de l'axe horizontal *cd*, il est évident que le plan du rectangle deviendra vertical, le côté *ef* tendant à monter, et le côté *gh* à descendre ; car, dans le côté *ef*, le courant s'éloignant du point de croisement par rapport au courant *ab*, il est attiré par la partie supérieure de ce courant et repoussé par la partie inférieure ; c'est le contraire pour *gh*, le plan du rectangle deviendra donc vertical ; une fois dans cette position, il tend à se tourner de manière à passer par la direction du courant vertical *ab*, car le côté vertical le plus voisin est attiré et l'autre repoussé. Ainsi, lorsqu'un courant rectangulaire parfaitement mobile est sollicité par un courant vertical fixe, il tend à se tourner dans un plan vertical passant par la direction du courant fixe, et à s'y arranger de manière que son côté le plus près marche dans le même sens que ce courant.

Si nous considérons maintenant trois courants rectangulaires équidistants (Fig. 21), il est évident que c'est celui du milieu qui sera dans le plan vertical du courant fixe, les deux autres étant appelés par des forces dont la résultante sera dans ce plan. Si, au lieu d'en concevoir seulement trois, nous considérons un solénoïde composé d'une infinité de rectangles, il en résultera, par la même raison, que l'axe du solénoïde sera exactement *en croix avec le courant.*

Ce résultat s'applique à un cercle aussi bien qu'à un rectangle ; donc un solénoïde quelconque sollicité par un courant se tourne en croix avec lui.

Nous pouvons ajouter, de plus, que le pôle austral est à gauche, car la gauche du courant étant derrière le plan de la figure 22, si l'on regarde en face le bout du solénoïde qui est derrière ce plan, on voit, en effet, qu'on a le courant ascendant à droite, ce qui est le caractère du pôle austral (**264**). Ainsi, en dernier résultat, la condition d'équilibre entre un solénoïde et un courant rectiligne, est que la section moyenne du solénoïde et le courant soient dans un même plan, et que le pôle austral du solénoïde soit à gauche du courant.

Cette direction du solénoïde libre ou de l'aiguille aimantée

libre étant une fois démontrée, on comprend combien il est facile d'expliquer, soit les conditions d'équilibre des aimants qui ne peuvent se mouvoir qu'autour d'un axe donné ou sur des plans donnés comme les aimants flottants, soit les conditions d'équilibre des courants assujettis d'une manière quelconque, et sollicités par des aimants.

Rotation des aimants par les courants. — Lorsque l'aimant tourne sur lui-même comme dans la figure 23, Ampère explique la rotation de la manière suivante : *abcd* étant la section de l'appareil par la surface du mercure, et *af* étant l'un des courants qui glissent sur la surface du mercure pour gagner l'anneau de cuivre par lequel il doit sortir du vase, la portion *ab* est attirée par *af*, tandis que *ad* est repoussé ; par conséquent l'aimant doit tourner en sens contraire du courant qui le constitue. Quand le courant passe, au contraire, du mercure à l'aimant, celui-ci tourne dans le sens de son courant.

Lorsque l'aimant décrit un cercle autour du conducteur qui plonge dans le mercure (Fig. 24), l'explication est un peu plus compliquée ; nous la donnerons telle qu'elle se trouve dans l'ouvrage d'Ampère :

« Représentons la section horizontale du solénoïde par le petit cercle *etft'* (Fig. 24), dont le centre est *a*, et dont la circonférence *etft'* est un des courants électriques dont il est composé. En supposant que ce courant se meuve dans le sens *etft'*, il sera attiré par les courants du mercure, tels que *puz*, qui se trouvent, dans la figure, à droite de *etft'*, parce que la demi-circonférence *etf*, où le courant va dans le même sens, en est plus rapprochée que *ft'e*, où il va en sens contraire. Soit *as* cette attraction égale à la différence des forces exercées par les courants *puz* sur les deux demi-circonférences, et qui passe nécessairement par leur centre *a*, puisqu'elle résulte des forces que ces courants exercent sur tous les éléments de la circonférence *etft'* qui leur sont perpendiculaires, et sont, par conséquent, dirigés suivant les rayons de cette circonférence. Le même courant *etft'* du solénoïde est, au contraire, repoussé par les courants qui, comme *p' u' z'*, sont, dans la figure, à gauche de ce courant *etft'*, parce qu'ils sont en sens contraire dans la demi-circonférence *ft' e*, la plus voisine de *p' u' z'*. Soit *as'* la répulsion qui résulte de la différence des actions exercées par les courants *p' u' z'* sur les deux demi-circonférences *fte*, *etf*, elle sera égale à *as*, et

fera, avec le rayon *cad*, l'angle $das' = cas$, puisque tout est égal des deux côtés de ce rayon : la résultante *ar* de ces deux forces lui sera donc perpendiculaire ; et, comme elle passera par le centre *a*, ainsi que ses deux composantes *as*, *as'*, le solénoïde n'aura aucune tendance à tourner autour de son axe, comme on l'observe, en effet, à l'égard de l'aimant flottant que représente ce solénoïde ; mais il tendra à chaque instant à se mouvoir suivant la perpendiculaire *ar* au rayon *cad* ; et comme, lorsqu'on fait cette expérience avec un aimant flottant, la résistance du mercure détruit à chaque instant la vitesse acquise, on voit cet aimant décrire la courbe perpendiculaire à toutes les droites qui passent comme *cad* par le point *c*, c'est-à-dire la circonférence dont *ac* est le rayon. »

Rotation des courants par les aimants. — L'explication de ce phénomène repose sur un principe général qui ne peut pas être démontré directement par l'expérience, mais qui peut seulement, au moyen du calcul, se déduire des propriétés attractives et répulsives qui existent entre les courants, et que nous avons précédemment démontrées. Ce principe général peut être énoncé de la manière suivante : la résultante de toutes les actions qu'un solénoïde indéfini exerce sur un courant rectiligne de petite étendue est une force perpendiculaire au triangle qui a pour base le courant, et pour sommet l'extrémité de l'axe du solénoïde. Cette force est appliquée au milieu de la longueur du courant, et elle est indépendante de la direction de l'axe du solénoïde, qui peut être quelconque, pourvu que son extrémité reste toujours au même point.

Ainsi, *ab* (Fig. 25) étant un petit courant rectiligne, et *s* l'extrémité de l'axe d'un solénoïde indéfini, c'est-à-dire, dont l'autre extrémité *s'* puisse être regardée comme infiniment éloignée, la résultante *mv* de l'action du solénoïde sur le courant *ab* est perpendiculaire au plan *sab*, et appliquée au point *m*, milieu de *ab* ; elle est du reste tout à fait indépendante de la courbure et de la direction de l'axe *ss'*, qui peut prendre toutes les positions possibles autour du point *s*, sans que la résultante éprouve de changement ni dans sa grandeur ni dans sa direction [1].

[1] L'énoncé précédent suffit pour l'objet que nous nous proposons. Cependant, pour ceux qui voudront comprendre le principe dans son ensemble, nous ajouterons que la résultante dont il s'agit est en raison directe :

1° de l'intensité du courant du solénoïde,

Dans l'impossibilité de démontrer ce principe, nous essayerons cependant de l'appliquer à quelques cas particuliers pour en faire sentir la justesse.

1° Si la direction prolongée de l'élément vient passer à l'extrémité *s* de l'axe du solénoïde, l'action se réduit à zéro, d'après le principe; et c'est ce qu'il est facile de démontrer directement.

ab étant le courant élémentaire (Fig. 26) et *s* le sommet du solénoïde, concevons un petit courant circulaire ayant son centre au point *s*, et dont le plan soit perpendiculaire à *sab;* menons un diamètre quelconque *cd*, et considérons les effets de deux éléments *x* et *y* diamétralement opposés : entre l'élément *x* et *ab* il y a attraction, parce qu'ils s'approchent tous deux du point de croisement; mais, entre l'élément *y* et *ab* il y a une attraction égale et contraire qui détruit la première; et, comme il en est de même de tous les éléments diamétralement opposés, il en résulte évidemment que l'action du cercle sur l'élément est tout à fait nulle. Il en serait de même de tous les cercles du solénoïde indéfini dont l'axe serait sur le prolongement de *ab*.

Il en serait de même encore si le premier cercle du solénoïde était dans un plan passant par l'élément *ab*, et si l'axe du solénoïde était perpendiculaire à ce plan (Fig. 27); car, les cercles du solénoïde étant infiniment petits par rapport à la distance *sa*, les actions opposées comme celles qui résultent de deux éléments consécutifs en *c* et de deux éléments consécutifs en *d*, se détruisent toujours.

2° Si la direction de l'élément *ab* ne passe plus par l'extrémité de l'axe du solénoïde, si elle est, par exemple, perpendiculaire à cet axe et à une certaine distance *sa* (Fig. 28), il y a alors une résultante perpendiculaire au triangle *sab :* en effet, les éléments *e* et *f*, parallèles au courant *ab*, produiront des effets égaux et contraires; mais les deux éléments symétriques *x* et *y* de la partie supérieure donneront naissance à une résultante verticale *mv*, et les deux éléments *x'* et *y'* pareillement symétriques de la partie inférieure donneront naissance à une résultante ver-

2° de l'intensité du courant de l'élément *ab*,
3° de la longueur *ab* de l'élément,
4° du sinus de l'angle *ams*,
et qu'en même temps elle est en raison inverse du carré de la distance *ms*

ticale dirigée dans le même sens que la première ; ainsi la résultante du cercle entier sera verticale et par conséquent perpendiculaire au triangle *sab*.

Ces exemples particuliers suffisent pour donner une idée des bases sur lesquelles repose le principe général. Nous allons voir maintenant comment ce principe explique la rotation des courants verticaux ou horizontaux produits par les aimants.

Courants verticaux. — *ab* (Fig. 29) étant un courant vertical mobile autour de l'axe *zx*, et *s* étant l'extrémité de l'axe *s's* d'un solénoïde, la résultante de l'action du solénoïde est perpendiculaire au triangle *sab*, dans toutes les positions que le courant peut prendre autour de son axe de rotation ; par conséquent le courant doit tourner d'un mouvement continu. La direction de ce mouvement change avec le sens du courant *ab*, et aussi avec le pôle du solénoïde ou de l'aimant, comme nous l'avons observé (**253**).

Courants horizontaux. — Le même raisonnement s'applique au courant horizontal *ab* (Fig. 30).

Action des aimants les uns sur les autres.

266. Attraction et répulsion des aimants. — Concevons un solénoïde qui s'étende indéfiniment de part et d'autre du point *m* (Fig. 31), et dont le courant marche dans le sens indiqué par les flèches ; concevons ensuite que ce solénoïde soit coupé en *m*, et que les deux parties soient écartées l'une de l'autre comme le représente la figure 32. Il résulte de notre définition (**264**) : 1° que l'extrémité *a* est un pôle austral, car, en regardant en face le cercle qui la termine, on voit que le courant *ascendant* se trouve à droite ; 2° que l'extrémité *b* est un pôle boréal, car, en regardant en face le cercle qui la termine, on voit que le courant *ascendant* se trouve à *gauche ;* ainsi, en coupant un solénoïde perpendiculairement à son axe, les deux pôles qui en résultent sont toujours deux pôles de noms contraires, comme quand on brise un aimant.

De plus, il est évident que les pôles contraires *a* et *b* des deux solénoïdes s'attirent l'un l'autre ; car, en considérant seulement les cercles qui les terminent, on voit que les courants y sont parallèles et dirigés dans le même sens, et il en est de même de tous les autres. On démontre d'ailleurs par le calcul que cette

attraction est en raison inverse du carré de la distance qui sépare les deux pôles *a* et *b*; ce qui est, entre les solénoïdes et les aimants, une nouvelle analogie bien fondamentale.

Comme on démontre d'ailleurs (ce que nous avons déjà indiqué (**265**)) que l'action d'un solénoïde indéfini est tout à fait indépendante de la position que son axe peut prendre autour de son extrémité, il en résulte que les deux solénoïdes de la figure 32 peuvent prendre toutes les positions possibles, l'un autour du point *a*, et l'autre autour du point *b*, sans cesser pour cela de s'attirer avec la même intensité.

Ainsi, quand on coupe un solénoïde indéfini, on donne naissance à deux pôles qui sont en tout comparables aux deux pôles que l'on obtiendrait en brisant un barreau aimanté d'une très grande longueur.

Lorsqu'un solénoïde a une longueur déterminée, comme *ab* (Fig. 33), ses deux pôles *a* et *b* sont évidemment, l'un un pôle austral et l'autre un pôle boréal, puisque, en regardant le bout *a*, le courant ascendant est à droite, tandis qu'en regardant le bout *b* il est à gauche. Or, en brisant le solénoïde défini, on obtiendrait des résultats analogues à ceux que donnent les solénoïdes indéfinis, du moins quant au sens de l'action, mais non pas quant à l'intensité; car ici, les seconds pôles de chacun des solénoïdes que l'on obtient n'étant plus infiniment éloignés, on doit tenir compte de leur action.

Par conséquent deux solénoïdes définis, tels que *ab* et *a'b'* (Fig. 34), qui agissent l'un sur l'autre, donnent naissance, comme deux aimants, à un système de quatre forces, deux attractives et deux répulsives; les forces attractives s'exercent suivant *ab'* et *ba'*, et les forces répulsives suivant *aa'* et *bb'*.

Aimantation. — Dans la théorie dont nous nous occupons, les corps magnétiques, comme le fer doux ou l'acier non aimanté, sont considérés comme ayant déjà des courants autour des molécules qui les constituent; seulement, on est obligé de faire à leur égard plusieurs hypothèses distinctes :

1[re] *Hypothèse.* On admet que les courants étant dirigés indistinctement et confusément dans tous les sens possibles, l'ensemble des actions qu'ils exercent au dehors est toujours réduit à zéro, parce que ceux qui agissent dans un sens détruisent toujours l'effet de ceux qui agissent en sens contraire.

2[e] *Hypothèse.* On admet qu'au moment où une cause exté-

rieure quelconque vient à faire sentir son action sur les courants, ils se rangent en tout ou en partie dans un certain ordre pour obéir à l'action qui les sollicite.

3^e^ *Hypothèse.* Si le corps est sans force coercitive, comme le fer doux, l'on admet que la cause extérieure cessant d'agir, les courants, par leur action mutuelle, retombent dans l'état de confusion où ils étaient d'abord : mais si le corps est doué de force coercitive, comme l'acier, on admet au contraire que les courants, une fois rangés dans l'ordre convenable pour former des solénoïdes, conservent cet ordre malgré les actions intérieures qui peuvent s'exercer pour le troubler.

On voit, d'après cela, que l'aimantation n'est qu'un arrangement des courants qui préexistent dans les corps magnétiques : si on les tourne dans un sens, les pôles se montrent dans un certain ordre : et, si on les tourne en sens contraire, les pôles se montrent en sens inverse.

Il reste assurément de belles recherches à faire sur ces courants moléculaires, soit pour démontrer leur existence d'une manière plus directe, soit pour arriver jusqu'à la cause qui les produit, soit enfin pour déterminer les principales circonstances des modifications qu'ils reçoivent de la part de la chaleur ou des autres agents physiques : mais, en attendant, il nous a semblé nécessaire d'exposer avec quelques développements une théorie qui établit des rapports si remarquables entre les phénomènes du magnétisme et ceux de l'électricité.

CHAPITRE V.

Causes diverses qui donnent naissance à des courants électriques.

Puisque les courants électriques ne sont autre chose que la recomposition des deux fluides contraires, il en résulte que toutes les causes qui sont capables de développer de l'électricité sont capables aussi de produire des courants; car les deux fluides ont toujours développés simultanément; et, comme chaque fluide libre tend à se réunir à une égale quantité de fluide contraire, il suffit de permettre cette réunion pour que le courant soit produit. On pourrait penser que le résultat inverse doit toujours avoir lieu, c'est-à-dire qu'il suffit d'interrompre un courant quelconque pour avoir les deux électricités opposées à l'état de repos et de tension; mais il n'est pas toujours possible de le démontrer par l'expérience, soit que nos moyens d'observation soient trop peu délicats, soit que, dans certains cas, la circulation de l'électricité doive être réellement une condition essentielle de son développement. Sans rien décider à cet égard, nous nous bornerons à remarquer que tous les courants jusqu'à présent connus doivent leur origine à quatre causes différentes, savoir : à des actions mécaniques, à des actions physiques, à des actions chimiques, à des actions physiologiques; et nous examinerons successivement les principales circonstances de leur formation, et les procédés particuliers au moyen desquels on peut les rendre sensibles.

Actions mécaniques.

267. Le *frottement*, la *pression* et le *clivage*, sont trois genres d'actions mécaniques que l'on peut distinguer l'un de l'autre par rapport à l'électricité qu'ils développent, bien que l'on ne sache pas s'ils impriment aux atomes ou à leurs groupes moléculaires des modifications réellement différentes.

Le *frottement* peut être varié de mille manières; mais, dans les machines ordinaires, on a essayé de réunir les conditions les plus propres à donner le maximum d'effet. Lorsque, au lieu d'ac-

cumuler l'électricité sur les conducteurs, on veut la transformer en courant, il suffit de disposer un fil de communication entre les conducteurs et les coussins, ou seulement entre les conducteurs et le sol; ce fil est alors traversé par un courant comme s'il réunissait les deux pôles d'une pile plus ou moins forte, et il est en effet capable d'agir sur l'aiguille aimantée. Cependant, son action est peu énergique : une grande machine, produisant de rapides et brillantes étincelles à une distance considérable, donne un si faible courant qu'il faut pour en constater la présence, un multiplicateur assez sensible; une machine de Nairne assez puissante ne donne, par exemple, que 30 ou 40° de déviation aux aiguilles compensées d'un multiplicateur de 500 tours. (Colladon, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIII, p. 62). Dans ces expériences, il importe surtout que les différents tours du multiplicateur soient bien isolés l'un de l'autre : pour cela, il faut donner au fil une double ou triple couverture de soie, et l'envelopper encore de taffetas gommé, ou le passer dans un bain de résine fondue et mélangée de gomme laque.

Lorsque les extrémités du multiplicateur ne sont pas en contact avec les conducteurs, mais seulement présentées à distance, le courant est plus faible, et son intensité paraît être en raison inverse de la distance, du moins pour les distances comprises entre 1 décimètre et 1 mètre.

Si les courants produits par les machines sont si faibles lorsqu'on les compare à ceux que donnent les piles voltaïques, cela tient sans doute à la prodigieuse vitesse avec laquelle les fluides électriques se transmettent, et à la lenteur avec laquelle le frottement les développe. Cependant il n'est pas démontré, jusqu'à présent, que l'électricité n'ait qu'un mode unique de transmission au travers des conducteurs, et l'on ne pourra décider cette question que par la mesure exacte des quantités de fluides qui passent et des effets qu'ils produisent.

On a fait de nombreux essais pour découvrir comment il arrive que le frottement dégage de l'électricité; mais, sur ce point, l'on n'est parvenu à aucune notion précise. Quelques physiciens, après de longues discussions que je ne puis pas rapporter ici, disent, il est vrai, que la séparation des fluides est due à l'ébranlement ou au déplacement des molécules; mais, à mon avis, cette explication n'explique rien; car, dans les changements d'état des corps, à coup sûr il y a ébranlement et déplacement

des molécules, et cependant aucune électricité n'est produite; il reste donc d'autres conditions essentielles qui sont inconnues.

D'autres supposent que le frottement qui donne de l'électricité est toujours accompagné d'une action chimique, et qu'il suffit d'empêcher cette action pour que l'électricité cesse de se produire. Cette opinion repose principalement sur l'expérience suivante du docteur Wollaston (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XVI, p. 53). Une machine électrique ayant été enfermée dans un vase où l'on pouvait changer l'air, on voyait le développement d'électricité cesser ou reprendre son énergie, suivant que le vase était rempli d'acide carbonique ou d'air atmosphérique; mais cette expérience ne suffit pas pour démontrer, d'une manière rigoureuse, que toute l'électricité résultant du frottement est due en réalité à l'action chimique que le frottement détermine, et non à l'action mécanique qu'il exerce. Pour résoudre nettement cette question, il faudrait constater la nature et la quantité de l'action chimique produite par le frottement, et la comparer à la quantité des fluides décomposés.

S'il nous est impossible d'assigner la véritable origine de l'électricité qui se manifeste par le frottement, nous essayerons du moins d'indiquer les principales circonstances qui paraissent agir d'une manière constante pour en modifier le développement. Les nombreuses expériences qui ont été faites sur ce sujet peuvent être résumées par les propositions suivantes :

1° Deux corps solides quelconques, bons conducteurs ou mauvais conducteurs, prennent toujours, par le frottement, l'un l'électricité résineuse et l'autre l'électricité vitrée, lorsqu'on prend toutefois les précautions convenables pour les sécher, pour les isoler, etc., etc.

Le frottement qui s'exerce entre les solides et les liquides paraît suffisant pour développer aussi de l'électricité dans un grand nombre de cas. Le mercure est probablement, sous ce rapport, le plus énergique des liquides.

Le frottement des liquides entre eux pourrait sans doute, dans les circonstances convenables, développer aussi de l'électricité.

Le frottement des gaz, soit entre eux, soit avec les liquides ou les solides, ne paraît, dans aucun cas, développer de l'électricité, du moins quand les gaz ne sont point chargés de parcelles solides ou liquides.

2° Lorsqu'on élève la température d'un corps, on lui donne une tendance à prendre l'électricité résineuse; et, comme cette tendance n'est pas la même pour des accroissements égaux de la température, il en résulte qu'en frottant deux corps à des températures différentes, celui qui est vitré à une température plus basse peut devenir résineux à une température plus élevée; il en résulte aussi que deux morceaux d'une même substance, quoique parfaitement pareils, et prenant une égale part au frottement, peuvent donner de l'électricité s'ils sont à des températures différentes, le plus chaud prenant toujours alors l'électricité résineuse.

3° L'état de la surface d'un corps n'est pas sans influence sur l'espèce de fluide qu'il prend par le frottement : on remarque, en général, que les petites aspérités de la surface donnent aux corps, et surtout aux corps mauvais conducteurs, une tendance à prendre l'électricité résineuse. Ainsi, en frottant l'une sur l'autre deux lames du même verre, l'une polie et l'autre dépolie, la première prend l'électricité vitrée et la seconde l'électricité résineuse : cependant, il y a d'autres causes qui produisent le même effet, comme nous l'avons indiqué pour le disthène (**209**).

4° Une lame de métal prend toujours l'électricité vitrée, lorsqu'elle est frottée par de la poudre plus ou moins fine du même métal (Becquerel, t. II, p. 117) : on en fait l'expérience, en mettant en contact avec l'un des plateaux du condensateur une petite coupe dans laquelle on reçoit la fine limaille métallique qui a été projetée avec plus ou moins de vitesse sur une lame de même métal que l'on tient à la main; l'électricité dont se charge le condensateur montre que la limaille a pris l'électricité résineuse par son frottement rapide sur la lame.

5° Deux lames de différents métaux, frottées l'une contre l'autre, prennent assez d'électricité pour donner naissance à un courant sensible : on en fait l'expérience en adaptant les lames aux deux extrémités du fil d'un multiplicateur, et en les faisant ensuite glisser l'une contre l'autre; le sens de la déviation de l'aiguille indique l'espèce du fluide qui se développe sur chaque lame, et l'on a pu former ainsi la table suivante, dans laquelle chaque métal est vitré avec ceux qui le suivent, et résineux avec ceux qui le précèdent (Becquerel, t. II, p. 114) :

Antimoine.	Argent.	Platine.
Arsenic.	Or.	Palladium.
Cadmium.	Cuivre.	Cobalt.
Fer.	Étain.	Nickel.
Zinc.	Plomb.	Bismuth.

6° La tension de l'électricité développée par le frottement est indépendante de la vitesse, de la pression, de l'étendue des surfaces en contact, de l'épaisseur des corps frottants et du mode de frottement. (Péclet, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LVII, p. 337.)

La simple pression, sans frottement latéral, exerce sur les molécules des corps une action mécanique qui n'est sans doute pas la même que celle du frottement, bien qu'il soit difficile d'assigner avec précision en quoi consiste la différence; cependant, la pression est capable aussi de développer de l'électricité, comme nous l'avons vu (**235**).

M. Becquerel a construit un grand appareil pour étudier ces phénomènes, et il conclut que la quantité des fluides dégagés est proportionnelle à la pression; cependant il ne paraît guère possible de présenter ces résultats comme l'expression d'une loi générale, car les liquides n'ont pas été soumis à l'épreuve, et les gaz, qui sont si éminemment compressibles, n'ont manifesté aucune apparence électrique.

Le clivage s'opère avec plus ou moins de facilité dans la plupart des corps lamellaires régulièrement cristallisés, comme le talc, le mica, la chaux sulfatée, la baryte sulfatée, le feldspath, la topaze, etc. Si l'on fixe des manches isolants aux deux grandes faces d'une lame mince de l'un de ces corps, et que, par un effort particulier, on la divise en deux dans le sens du clivage, les deux lamelles qui en résultent sont électrisées, l'une vitreusement, l'autre résineusement. (Becquerel, t. II, p. 112.)

Ces électricités sont sans doute trop faibles pour que l'on puisse les transformer en un courant sensible.

Actions physiques.

Les actions physiques qui développent de l'électricité sont : les actions capillaires, et les actions de la chaleur, du magnétisme et de l'électricité; car, jusqu'à présent, on n'a pas lieu de penser que l'action de la lumière puisse, dans aucune circonstance, déterminer la séparation des fluides électriques.

268. Action capillaire. — M. Becquerel attribue à l'action capillaire les phénomènes électriques qu'il a observés dans les circonstances suivantes :

A l'un des bouts du fil d'un multiplicateur très-sensible on adapte une cuiller de platine remplie d'acide nitrique pur ; à l'autre bout du même fil on adapte une éponge de platine soigneusement lavée à l'acide nitrique, et ensuite chauffée au rouge ; on plonge ensuite cette éponge dans l'acide de la cuiller ; et l'on observe une déviation dans l'aiguille du multiplicateur ; le sens du courant montre que l'éponge a pris l'électricité négative : cependant, après quelques instants, on observe un courant contraire.

Lorsque l'acide est étendu de la moitié de son poids d'eau, l'on n'observe que le premier effet ; il n'y a plus de courant inverse.

L'acide chlorhydrique concentré donne des effets inverses de ceux de l'acide nitrique pur.

Ces faits sont peut-être trop restreints et trop complexes pour qu'il soit permis d'en conclure d'une manière générale que l'action capillaire dégage de l'électricité.

269. Phénomènes thermo-électriques. — L'action de la chaleur ne se fait pas seulement sentir sur la tourmaline et sur d'autres cristaux pour les rendre électriques, comme nous l'avons vu (**236**), mais elle se fait sentir aussi sur les corps bons conducteurs, et particulièrement sur les métaux, pour y développer des courants plus ou moins énergiques qui ont été découverts en 1821 par le docteur Seebeck, de Berlin : ces courants, que l'on appelle *thermo-électriques*, à cause de leur origine, constituent aujourd'hui, sous le nom de *thermo-magnétisme*, l'une des branches les plus intéressantes de l'électro-magnétisme. Nous ne ferons connaître ici que les principales conditions sous lesquelles ils se produisent ; mais, dans l'un des chapitres suivants, nous essayerons d'établir les lois remarquables de leur intensité.

Les recherches qui ont été faites sur la formation de ces courants peuvent être résumées par quelques propositions générales que nous allons successivement examiner.

Première proposition. — Deux fils métalliques étant soudés bout à bout, de manière à composer un circuit fermé de forme quelconque, il s'établit dans le circuit un courant plus ou moins énergique, toutes les fois que les deux soudures sont à des tem-

pératures différentes, et le courant persiste aussi longtemps que la différence des températures est maintenue.

On démontre cette proposition pour un cas particulier au moyen de l'appareil qui est représenté (Pl. 21, Fig. 1) : *ss'* est un cylindre de bismuth; *scs'* une barre ou une lame de cuivre recourbée et soudée aux extrémités *s* et *s'* du cylindre de bismuth; *ab* une aiguille aimantée, libre sur son pivot. Les soudures *s'* et *s* étant à la température ambiante, on dirige le plan vertical de l'appareil dans le méridien magnétique; alors, si l'on échauffe la soudure *s* par exemple, l'aiguille éprouve une déviation plus ou moins considérable, et, si l'on refroidit la même soudure *s* au-dessous de la température ambiante, l'aiguille éprouve une déviation en sens contraire.

Ces mouvements de l'aiguille, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, accusent bien évidemment la présence d'un courant électrique qui se propage dans un sens lorsque la soudure *s* est plus chaude que la soudure *s'*, et dans le sens opposé quand au contraire c'est la soudure *s'* qui est plus chaude que la soudure *s*. Cette conséquence se confirme encore en agissant sur la soudure *s'*, au lieu d'agir sur la soudure *s*.

Tous les métaux ne donnent pas des résultats aussi frappants que le bismuth et le cuivre; mais alors, au lieu d'une seule aiguille, on emploie un système de deux aiguilles compensées comme on le voit dans la figure 2 : la bande supérieure *scs'* est fendue pour laisser passer l'aiguille inférieure, et le pivot s'élève jusqu'à l'aiguille supérieure.

Pour faire voir que les différences de température les plus imperceptibles entre le bismuth et le cuivre sont capables de développer des courants très-énergiques, on emploie l'appareil qui est représenté dans la figure 3.

Enfin, pour un très-grand nombre d'expériences, il est nécessaire d'avoir recours à l'emploi du multiplicateur; mais les *multiplicateurs thermo-électriques* doivent, en général, être composés avec un fil très-gros et n'avoir qu'un petit nombre de tours, comme nous l'expliquerons plus loin (chap. v) : si, avec les deux extrémités du fil de cuivre d'un tel multiplicateur, on touche, par exemple, un morceau de bismuth ou d'antimoine, on verra que la moindre différence de température aux deux points de contact détermine une déviation considérable.

Pour étudier par ce moyen les courants thermo-électriques

donnés par deux métaux quelconques, comme le fer et le platine, il suffit de couper en deux un fil de platine, et d'adapter chacune de ces moitiés à chacun des bouts du multiplicateur, de manière que le contact soit bien métallique ; alors, pourvu que ces jonctions soient exactement à la même température, le multiplicateur, armé de ses deux bouts de platine, jouira des mêmes propriétés que s'il était tout entier composé d'un fil de platine continu, c'est-à-dire qu'en touchant maintenant avec un fil de fer les deux extrémités du multiplicateur, on aura des courants qui ne pourront résulter que de la différence de température des deux points de contact du fer et du platine.

En soumettant les différents métaux à cette épreuve, ou à d'autres analogues, on arrive aisément à démontrer la proposition générale que nous avons énoncée ; mais l'on reconnaît en même temps que les différents couples métalliques ont à cet égard des sensibilités très-différentes ; car, dans les mêmes circonstances, les uns donnent des courants d'une grande énergie, et les autres des courants excessivement faibles.

On a pareillement essayé, par les mêmes moyens, de classer les métaux à raison de leur tendance à prendre l'électricité positive ou négative, et les résultats que l'on a obtenus sont représentés dans le tableau suivant, où chaque métal est positif avec tous ceux qui le suivent, et négatif avec tous ceux qui le précèdent :

Antimoine.	Laiton.	Cobalt.
Arsenic.	Rhodium.	Palladium.
Fer.	Plomb.	Platine.
Zinc.	Étain.	Nickel.
Or.	Argent.	Mercure.
Cuivre.	Manganèse.	Bismuth.

M. Becquerel a observé qu'à de très-hautes températures le fer et le platine changent de rôle ; mais cette inversion ne paraît pas constante ; car je n'ai rien observé de pareil dans un très-grand nombre d'expériences dont il sera question à l'article du *Pyromètre magnétique*, destiné à la mesure des hautes températures.

Deuxième proposition. — Lorsqu'on chauffe ou qu'on refroidit quelques points d'un circuit métallique fermé et composé

d'un seul métal homogène, on y détermine, sous certaines conditions, des courants plus ou moins énergiques.

Le bismuth et l'antimoine paraissent être les métaux les plus propres à montrer ce phénomène remarquable : ainsi, en prenant par exemple un morceau d'antimoine de forme quelconque, et en disposant sur une de ses faces une petite aiguille aimantée légèrement suspendue, on trouve toujours sur le contour de ce morceau plusieurs points tels qu'en les chauffant on imprime à l'aiguille aimantée une déviation très-sensible dans un sens ou dans l'autre : cette observation est due aussi au docteur Seebeck.

Plusieurs physiciens ont étudié ce phénomène remarquable : MM. Yélin, Cumming et Sturgeon se sont particulièrement appliqués à donner des formes régulières aux morceaux de bismuth et d'antimoine, ou à composer avec ces métaux des circuits rectangulaires, elliptiques, circulaires, etc., etc., pour déterminer les points les plus efficaces et les directions des courants qui résultent de l'échauffement ou du refroidissement de ces points. Mais, jusqu'à présent, il nous paraît impossible d'énoncer aucun fait général, soit sur la direction, soit sur l'intensité de ces courants singuliers; car des circuits semblables et de grandeurs différentes donnent presque toujours des résultats différents.

Quelques observateurs attribuent ces effets à des groupes cristallins qui se forment pendant le refroidissement des métaux, et qui empêchent l'uniforme propagation de la chaleur dans tous les sens. Cette opinion n'est pas sans fondement; mais il nous semble que des observations plus directes seraient nécessaires pour l'établir d'une manière rigoureuse.

M. Becquerel a donné plus d'extension à ce fait curieux; il a montré qu'il s'applique aussi à des fils de platine, et, en analysant avec sa sagacité ordinaire les principales circonstances qui modifient les résultats, il a établi le principe suivant : Lorsqu'un fil de platine forme un circuit fermé, et que sur un point de sa longueur se trouve un obstacle quelconque capable de ralentir la propagation de la chaleur, si l'on chauffe le fil à une petite distance de ce point, il se produit un courant qui dans cet intervalle est dirigé vers l'obstacle, et qui parcourt dans le même sens toute l'étendue du circuit.

Ainsi, en mettant les deux bouts d'un fil de platine en contact avec les deux extrémités d'un multiplicateur, et en mainte-

nant ces jonctions très-exactement à la même température, pour empêcher les effets thermo-électriques ordinaires, on obtient des courants dirigés de *a* en *b*, lorsqu'on chauffe en *a* après avoir replié le fil en hélice en *b*, ou après y avoir fait un simple nœud, comme on le voit dans la figure 4.

On obtient des effets analogues avec le cuivre lorsqu'il est un peu oxydé : ainsi, en accrochant en *b* les deux bouts d'un multiplicateur (Fig. 5) et en chauffant en *a*, il se manifeste un courant de *a* en *b* lorsque les fils ne sont pas parfaitement décapés. (Becquerel, t. II, p. 40.)

Cependant Nobili a obtenu des courants inverses avec des métaux plus oxydables, comme le zinc, le fer et l'antimoine. (*Biblioth. univ. de Genève*, t. XXVII, p. 118.)

270. Phénomènes d'induction. — Ces phénomènes ont été découverts par M. Faraday en 1831 ; ils ont reçu depuis une extension importante, comme nous le verrons (chap. VIII) ; mais les faits les plus fondamentaux qui les constituent peuvent se résumer de la manière suivante :

Lorsqu'un circuit conducteur fermé commence *à recevoir dans quelques-uns de ses points l'action d'un courant quelconque, il est traversé par* un courant inverse ; *lorsqu'il* cesse *de recevoir cette action, il est traversé par* un courant direct ; *enfin* pendant *qu'il reçoit cette action* d'une manière constante, *il n'est traversé par* aucun courant *et n'éprouve aucune modification apparente sensible.*

Nous allons indiquer les expériences par lesquelles on démontre la vérité de cette proposition, lorsque le circuit fermé est soumis à l'action d'un aimant, ou à l'action d'un courant, ou à l'action de la terre.

1° *Circuit soumis à l'action d'un aimant.* — Un fil métallique couvert de soie, de 100 ou 200 mètres de longueur est enroulé sur une bobine de bois ou de métal (Fig. 10), dont l'ouverture intérieure est assez grande pour recevoir un aimant ; les deux extrémités de ce fil communiquent avec les deux extrémités d'un galvanomètre suffisamment éloigné, et à l'instant où l'on introduit le pôle d'un aimant dans l'intérieur de la bobine, on voit l'aiguille du galvanomètre qui est déviée avec plus ou moins de force ; mais bientôt elle revient au repos, pendant tout le temps que l'aimant reste en place ; et, si l'on enlève l'aimant, elle s'agite de nouveau dans le sens opposé. La déviation de l'aiguille

donne le sens du courant d'induction qui traverse le circuit composé du galvanomètre et de la bobine. Il est facile de reconnaître que ce courant est inverse et marche en sens contraire de celui de l'aimant lorsque l'aimant *commence* à agir, et qu'il est direct et marche dans le même sens que celui de l'aimant quand l'aimant *cesse* d'agir ou quand on le retire de la bobine.

Lorsque le galvanomètre est très-sensible, il n'est pas nécessaire d'enrouler un aussi long fil sur la bobine ; on peut même quelquefois se dispenser d'un fil replié sur lui-même, et montrer l'effet d'une manière plus simple avec un seul fil qui joint les deux bouts du galvanomètre pour fermer le circuit : alors, en approchant vivement de ce fil un aimant pour l'éloigner et le rapprocher ensuite, on détermine des oscillations très-apparentes dans l'aiguille du galvanomètre. On conçoit que des expériences de cette nature peuvent être variées à l'infini.

2° *Circuit fermé soumis à l'action d'un courant.* — Sur une bobine analogue à la précédente, on enroule simultanément deux fils couverts de soie (Fig. 12) : l'un est destiné à laisser passer le courant d'une pile plus ou moins forte, c'est le circuit *inducteur*, l'autre est destiné à recevoir l'action *inductive* de ce courant, c'est le circuit *induit;* les extrémités de ce second fil sont par conséquent unies avec les deux extrémités du fil du galvanomètre. Quand les communications sont établies, on fait passer le courant par le premier fil, et à l'instant l'aiguille du galvanomètre accuse dans le second fil un courant d'induction inverse, c'est-à-dire, qui marche en sens contraire du courant inducteur ; puis elle revient au zéro et reste stationnaire ; mais, lorsqu'on rompt le circuit de la pile, elle se dévie de nouveau et accuse dans le second fil un courant d'induction direct, c'est-à-dire, marchant dans le même sens que celui de la pile.

3° *Circuit fermé soumis à l'action de la terre.* — On a obtenu quelques phénomènes en soumettant à la seule action de la terre des fils roulés en hélices plus ou moins longues ou pliés en rectangle, dont on change alternativement la position. (*Ann. de Chim.*, t. I, p. 116 et 124 ; *Bibl. universelle*, t. XLIX, p. 136.) Les effets, jusqu'à présent les plus considérables qui aient été obtenus, sont ceux que l'on doit à l'ingénieuse persévérance de MM. Palmieri et Santi-Linari ; ces physiciens avaient des premiers obtenu des indices de l'induction terrestre ; mais plus tard, en variant leurs appareils, ils sont parvenus, sans aucune interven-

tion du fer doux, et par la seule action inductive de la terre sur une bobine de fil de cuivre, à obtenir, non-seulement des déviations au galvanomètre, mais l'étincelle, la commotion, et quelques décompositions chimiques. L'appareil se compose d'un grand châssis elliptique ayant des axes de $1^m,2$ et $0^m,9$, sur lequel on enroule 200 mètres d'un fil de cuivre rouge de 1 millimètre et demi environ, et couvert de soie. Le grand axe est placé perpendiculairement au méridien magnétique, et c'est autour de cet axe qu'on imprime au châssis des mouvements de rotation plus ou moins rapides, afin que les plis du fil soient alternativement parallèles et perpendiculaires à la résultante magnétique de la terre. (*Archiv. de l'électricité*, t. V, p. 190.)

Dans la première des expériences que nous avons indiquées (Fig. 10), le circuit fermé commence à recevoir l'action de l'aimant à mesure que l'aimant s'avance, et il cesse de la recevoir à l'instant où l'aimant s'éloigne. Mais l'action magnétique peut commencer et cesser d'une autre manière : elle peut commencer au moment où les fluides magnétiques se décomposent, et cesser à l'instant où ils se recomposent ; or, la proposition générale s'applique encore à ce cas, comme on va le voir par l'expérience suivante :

ab est un fort aimant en fer à cheval (Fig. 11); *mcn* est une pièce de fer doux pliée aussi en fer à cheval, dont les deux branches sont enveloppées d'un grand nombre de tours d'un même fil ; le sens du fil doit être tel, qu'en y faisant passer un courant, les deux branches *m* et *n* prennent des pôles contraires ; les deux extrémités de ce fil sont réunies à une distance suffisante du fer et de l'aimant, et une simple aiguille aimantée est soumise à l'action de ce circuit fermé. Alors, si l'on approche l'aimant *ab* très-vivement des branches *m* et *n*, l'aiguille accuse un courant inverse, et, si l'on éloigne l'aimant, elle accuse un courant direct. Ainsi, la décomposition et la recomposition des fluides magnétiques développent des courants inverses et directs dans le circuit fermé qui est soumis à leur action.

Il est facile de voir que ce n'est pas l'influence directe des pôles sur les replis du fil qui donne naissance à ce courant d'induction : car ce courant acquiert une telle intensité que, si l'on approche seulement les deux extrémités du fil à une très-petite distance l'une de l'autre, on voit briller entre elles une vive étincelle, soit quand on approche l'aimant *ab* du fer doux *mcn*, soit quand on l'en éloigne ; cette étincelle électrique est donc pro-

duite par la seule action magnétique. De même, lorsqu'on tient le fil avec la main nue, on reçoit une commotion qui peut être comparée à celle d'une petite bouteille de Leyde, si l'aimant est assez puissant.

Les courants qui se développent ainsi par la décomposition et la recomposition des fluides magnétiques sont assez forts pour qu'une barre de fer doux entourée d'un fil en hélice excite dans ce fil un courant très-intense lorsque, après l'avoir placée dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, on la retourne de manière à mettre en bas le bout qui était en haut, ou *vice versa*.

Dans la deuxième des expériences (Fig. 12) qui servent à démontrer la proposition générale, le courant inducteur commence d'agir lorsque le courant commence à parcourir le premier fil, et il cesse d'agir au moment où le courant cesse; on pourrait donc supposer que les effets sont produits par quelques modifications qui accompagnent, soit l'établissement, soit la cessation du courant. Pour lever les doutes, M. Faraday a démontré, par quelques expériences, que l'on obtient exactement les mêmes résultats lorsqu'un courant étant établi d'une manière permanente dans un fil, on approche ou l'on éloigne de ce fil inducteur un autre fil destiné à recevoir l'induction.

Ainsi, quand nous disons que l'action *commence* sur un circuit fermé, il faut entendre : ou que le courant inducteur commence en effet à s'établir, ou, qu'étant déjà établi d'une manière permanente, il commence à agir parce qu'il s'approche plus près du circuit fermé, ces deux modes d'action produisant des effets complétement analogues. De même, quand nous disons que l'action *cesse* sur un circuit fermé, il faut entendre ou que le courant inducteur cesse en effet parce qu'il cesse d'exister, ou qu'il cesse d'agir parce qu'il s'éloigne du circuit fermé.

Réaction des plis d'une hélice. — A la proposition générale que nous venons de développer, nous devons encore ajouter un fait qui pourrait sans doute s'en déduire directement si l'on connaissait mieux les conditions mécaniques du mouvement des fluides qui constituent les courants ; ce fait est l'augmentation d'éclat ou plutôt le développement très-remarquable que prend l'étincelle électrique lorsqu'on rompt un circuit composé d'un grand nombre de circonvolutions du même fil, très-rapprochées l'une de l'autre.

Concevons une pile ordinaire composée d'une douzaine d'élé-

ments même très-faibles : on sait qu'elle ne pourra donner qu'une très-petite étincelle, lorsqu'on joindra les deux fils qui lui servent de pôles, ou lorsqu'on viendra à les séparer après les avoir unis pendant quelques instants. Cette étincelle sera sensiblement plus forte, si l'on ajoute au circuit un fil de 100 ou 200 mètres, étendu en ligne droite ou replié sur lui-même de manière que les plis soient éloignés l'un de l'autre de quelques millimètres; mais, si ce fil additionnel est replié en hélice ou enroulé sur une bobine, on observe alors une étincelle incomparablement plus large lorsqu'on vient à rompre le circuit; son éclat est décuple ou peut-être centuple de ce qu'il était d'abord. Ce phénomène singulier ne peut-être attribué sans doute qu'à la réaction que les différents plis de l'hélice exercent entre eux au moment où le courant cesse.

En même temps que l'étincelle se développe ainsi, la commotion que l'on reçoit à la rupture du courant acquiert pareillement une intensité extraordinaire.

Cette réaction du courant, sur la matière propre du circuit qui lui donne passage, au moment même où l'on en rompt la continuité, est ce que l'on appelle l'induction du courant sur lui-même, et le courant qui en résulte a quelquefois reçu le nom d'*extra-courant* ou même d'*intra-courant.*

Si la grande bobine dont nous venons de parler enveloppe une masse de fer doux et constitue un électro-aimant, le phénomène devient plus complexe : au moment de la rupture du circuit, le fil de la bobine reçoit en même temps deux courants superposés résultant de deux actions distinctes. Premièrement, il y a induction du courant sur lui-même, comme nous venons de le dire; secondement, il y a induction de la part des fluides magnétiques qui se recomposent dans la masse de fer doux. Aussi les effets prennent alors le plus haut degré d'intensité. Je puis en citer un exemple : les figures 13 et 14 (Pl. 21) représentent un électro-aimant que j'ai construit en 1831, et qui porte aisément plus de mille kilogrammes quand on lui donne le courant avec une forte pile de 24 paires (248) ; il se compose de deux fers à cheval opposés, formé avec des barres rondes de 8 à 10 centimètres de diamètre et de 60 à 80 centimètres de longueur totale, les deux branches de chaque fer à cheval sont enveloppées d'environ 1000 mètres de fil de cuivre de deux tiers de millimètre d'épaisseur. C'est le même courant qui traverse successivement

les 2000 mètres de fil, mais les hélices sont formées de telle sorte que les pôles de noms contraires se trouvent en présence. Aussitôt que le courant est établi, l'électro-aimant fixe *ab* soulève l'électro-aimant mobile *a'b'* et ils s'appliquent l'un contre l'autre avec tant de force, que l'on peut charger le plateau *cdl* (Fig. 13) d'un poids énorme qui dépasse souvent mille kilogrammes. Lorsqu'on vient ensuite à rompre les communications en soulevant hors du mercure les extrémités *n* et *p* du fil de 2000 mètres de longueur, on voit briller une très-large étincelle, tandis que la pile elle-même ne donne qu'une étincelle à peine visible, et si l'on prend, avec les mains un peu humides, ces deux extrémités pour les tirer hors du mercure, on reçoit une commotion presque foudroyante, comme je l'ai éprouvé à mon cours en 1832, par inadvertance ou plutôt sans savoir qu'il dût se produire un effet pareil. Cette expérience est, je crois, la première où l'on ait observé le développement considérable de l'étincelle, et l'intensité de la commotion. (*Bull. de la Société Philomatique*, année 1831, page 117.)

Actions chimiques.

271. Quelques physiciens avaient pensé depuis longtemps que la combustion doit être accompagnée d'un dégagement d'électricité. Lavoisier et Laplace, de Saussure, et, plus tard, Davy, avaient essayé de confirmer cette opinion ; mais, dans leurs expériences, ils n'étaient parvenus qu'à des résultats négatifs ou incertains. La question était en quelque sorte abandonnée, lorsque je fus conduit à m'en occuper dans mes *Recherches sur l'origine de l'électricité atmosphérique* (*Annal. de chim. et de Phys.*, t. XXXV, p. 401). Après quelques essais, je ne tardai pas à découvrir les conditions qui avaient été omises, et qui, une fois remplies, rendent les expériences parfaitement régulières et concluantes.

Dans la *combustion du charbon*, l'acide carbonique est électrisé positivement, et le charbon négativement. Voici le procédé que j'ai suivi pour constater ce fait fondamental :

Pour recueillir l'électricité négative, on prend un charbon conducteur taillé en cylindre, à bases bien parallèles; on enflamme une de ces bases, et, par l'autre, on le pose debout sur une longue plaque de laiton qui communique au condensateur (Pl. 21, Fig. 6); alors, en soufflant au moyen d'une vessie

remplie d'air ou d'oxygène, on entretient la combustion sur la base supérieure seulement, et le plateau inférieur du condensateur étant mis en communication avec le sol, il suffit de très-peu d'instants pour charger l'appareil.

Pour recueillir l'électricité positive, on dispose le charbon verticalement sur une plaque métallique communiquant au sol (Fig. 7); on le maintient en combustion comme dans l'expérience précédente, et on le présente à quelque distance au-dessous de la plaque de laiton; l'autre plateau du condensateur étant mis en communication avec le sol, l'appareil est promptement chargé par l'électricité vitrée que l'acide carbonique cède à la plaque à mesure qu'il s'élève contre sa surface. On comprend que si, au lieu de séparer l'acide carbonique au moment de sa formation, on le laissait en contact avec le charbon, l'on n'aurait plus que des signes électriques équivoques; c'est, en effet, ce que l'on obtient en brûlant le charbon par sa paroi latérale, au lieu de le brûler par sa base supérieure.

Dans la *combustion de l'hydrogène*, l'oxygène s'électrise encore positivement, et l'hydrogène négativement. Pour recueillir l'électricité négative, on adapte à la vessie qui contient l'hydrogène un tube de métal que l'on fait communiquer au condensateur, et à l'extrémité duquel on enflamme le gaz; on peut encore adapter au plateau du condensateur un long fil de platine, dont l'extrémité est roulée en spire étroite, et faire soigneusement plonger dans l'*intérieur* de la flamme la totalité de la spire (Fig. 8).

Pour recueillir l'électricité positive de l'oxygène, il suffit de présenter la spire précédente à quelque distance de la flamme (Fig. 9), ou de lui donner un diamètre plus grand que la flamme elle-même, de manière qu'elle puisse l'envelopper; alors elle prend de l'électricité positive, même à la distance de plusieurs millimètres. On comprend, d'après cela, combien les résultats doivent être variables et incertains, lorsque la spire est en partie dans la flamme et en partie en dehors. M. Becquerel pense que, dans ces expériences, l'électricité est en grande partie développée par l'inégale température du fil de platine, et il pense, de plus, que la flamme fait simplement l'office de corps conducteur (Becquerel, t. II, p. 86 et 87). Je regrette de ne pouvoir aucunement partager cette opinion. Les détails consignés dans mon Mémoire ne me permettent pas de l'admettre.

En faisant germer des plantes dans des capsules isolées, et au milieu d'une atmosphère suffisamment sèche, il m'a été possible de recueillir aussi les électricités qui se développent dans l'acte de la végétation.

Ces expériences, et d'autres analogues, conduisent à ce principe général : *Toutes les fois que l'oxygène se combine avec un autre corps, il y a dégagement d'électricité; l'oxygène donne toujours l'électricité positive, et le corps combustible l'électricité négative.*

On ne doit pas s'étonner, d'après cela, que, dans toutes les décompositions chimiques qui s'accomplissent au moyen de la pile, l'oxygène se rende au pôle positif et les corps combustibles au pôle négatif; car il faut sans doute que, pour se séparer et reprendre leur état libre, ces éléments reçoivent précisément la même quantité du même fluide qu'ils ont dégagé dans l'acte de leur combinaison.

Les phénomènes électriques qui se développent dans les décompositions chimiques sont précisément inverses de ceux qui se développent dans l'acte de la composition ou de la combinaison des éléments. Ce résultat général a été établi dans mon deuxième *Mémoire sur l'origine de l'électricité atmosphérique.* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXVI, p. 1.) Après avoir démontré que les changements d'état des corps ne donnent jamais aucun signe électrique, je fais voir que l'électricité apparaît aussitôt qu'il y a dans une dissolution quelques éléments chimiques qui se séparent. Mon appareil est le condensateur représenté dans la figure 6; seulement, à la plaque de laiton, l'on peut substituer une tige terminée par un anneau; sur la plaque ou dans l'anneau de la tige, on dispose un creuset de platine préalablement porté à une température plus ou moins haute, depuis 40 ou 50° jusqu'au rouge, ou au rouge blanc, et, dans ce creuset, on projette quelques gouttes des dissolutions que l'on veut soumettre à l'épreuve; les éléments volatils se dégageant, il y a ségrégation chimique et développement d'électricité; la charge du condensateur est quelquefois si grande, qu'on l'observe sans faire communiquer au sol, et que les lames d'or sont projetées contre les parois de la cloche presque aussitôt que le liquide tombe dans le creuset.

Dans les solutions alcalines, la vapeur d'eau a l'électricité négative et l'alcali a l'électricité positive.

Dans les solutions acides, au contraire, c'est l'eau qui est positive, et la solution restante qui est négative.

Lorsque les acides agissent sur les métaux, il se produit en général deux phénomènes : le premier est l'oxydation du métal, qui est une combustion; et le second, qui succède ordinairement au premier, est la combinaison de l'oxyde avec l'acide, qui est encore analogue à la combustion, en ce que l'acide joue toujours le même rôle que l'oxygène, tandis que l'oxyde joue le même rôle que le corps combustible; on doit donc s'attendre à un dégagement d'électricité plus ou moins considérable pendant que ces phénomènes s'accomplissent. C'est ce qui a été, en effet, constaté dès 1823, par MM. OErsted, Avogrado, Becquerel, de La Rive et Nobili; mais comme les métaux interviennent nécessairement dans les circuits, on pouvait toujours supposer que la force électromotrice n'était pas sans influence sur les courants produits. Voici les expériences par lesquelles on constate ce phénomène :

Lorsqu'on plonge les deux extrémités du multiplicateur dans un acide qui attaque le cuivre, on voit à l'instant l'aiguille s'agiter et accuser la présence d'un courant très-énergique; ce courant change de direction d'un instant à l'autre, et le moyen le plus efficace pour lui imprimer une direction constante paraît être de tenir l'un des fils en repos dans l'acide, tandis que l'autre est vivement agité. Cet effet résulte de l'inégale action chimique que l'acide exerce sur les deux fils.

Pour soumettre un autre métal à la même épreuve, il suffit d'en prendre deux morceaux attachés chacun à l'extrémité de l'un des fils du multiplicateur, et de prendre des précautions convenables pour qu'il n'y ait pas d'inégalité de température aux deux jonctions du métal avec le multiplicateur; alors les deux morceaux étant plongés dans l'acide, on observe les courants qui résultent de l'ensemble des actions chimiques qui s'exercent entre le métal et l'acide.

Ainsi, deux fils d'or pur étant simplement tortillés autour des deux extrémités du multiplicateur, et plongés ensuite dans l'eau régale, on obtient un courant très-sensible; M. Becquerel a rendu ce courant plus énergique encore, en plongeant ces fils d'or dans de l'acide nitrique à une assez grande distance l'un de l'autre, et en versant quelques gouttes d'acide hydrochlorique autour de l'un des fils seulement; dans ce cas, en effet, l'action

chimique est très-inégale ; car, au premier instant, elle est vive sur l'un des fils, et nulle sur l'autre.

Pour observer les courants qui résultent de l'action d'un acide sur un alcali, M. Becquerel verse l'acide dans une cuiller de platine, et il prend dans une pince de platine le morceau de soude ou de potasse qu'il veut soumettre à l'épreuve ; alors la pince et la cuiller étant mises en communication avec les extrémités du multiplicateur, on plonge l'alcali dans l'acide pour compléter le circuit.

Dans toutes les actions de cette nature que l'on peut varier à l'infini, on observe constamment que l'élément acide dégage l'électricité positive, et l'élément basique l'électricité négative.

Il en est de même encore dans les actions plus complexes où un métal prend la place d'un autre métal dans une dissolution saline ; nous en citerons un exemple :

Dans une dissolution de sulfate de cuivre, on plonge à quelque distance l'une de l'autre deux lames attachées aux deux bouts du multiplicateur, l'une de zinc et l'autre de cuivre, on observe un courant très-énergique, et l'on voit en même temps le zinc passer à l'état de sulfate de zinc pour prendre la place du cuivre, et celui-ci se révivifier sur la lame de cuivre.

On donne encore plus d'intensité au courant en disposant l'expérience de la manière suivante, comme l'a fait M. Becquerel, qui a, le premier, analysé tous ces phénomènes chimiques avec autant de bonheur que de persévérance. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLI, p. 1.) Dans un vase de verre ou de porcelaine, on dispose une cloison avec une membrane de vessie ; d'un côté, on met une dissolution de sulfate de zinc et une lame de zinc, et de l'autre une dissolution de sulfate de cuivre et une lame de cuivre : la réaction est à peu près nulle tant qu'il n'y a entre ces liquides d'autre communication que celle qui s'établit par la cloison : mais, aussitôt que les lames de zinc et de cuivre sont liées entre elles par un métal quelconque, par exemple, par le fil d'un multiplicateur, le zinc est vivement attaqué, tandis que le cuivre du sulfate de cuivre est révivifié sur la lame de cuivre elle-même ; il se produit en même temps un courant très-énergique, qui reste constant si l'on a soin d'ajouter du sulfate de cuivre solide pour maintenir la dissolution au même point de saturation. Nous reviendrons sur ce sujet (chap. VII) ; nous avons voulu seulement ici constater le fait du développement de

l'électricié par les actions chimiques, et des courants électriques qui en résultent.

Actions physiologiques et poissons électriques.

Pour compléter l'examen des causes diverses qui peuvent développer de l'électricité, nous avons à parler encore des *poissons électriques* et des phénomènes extraordinaires qu'ils présentent.

On sait depuis longtemps que la torpille a la propriété de frapper d'engourdissement la main qui la touche; quelquefois même la commotion est assez violente pour déterminer dans toute la longueur du bras une paralysie douloureuse qui dure plusieurs minutes, et qui peut être comparée à ce qu'on éprouve quand on se frappe le coude. Pour expliquer ces effets, l'on disait autrefois que la torpille *lance des molécules engourdissantes*, ou qu'elle agit comme un *ressort* qui se débande, ou comme un *corps sonore* qui est en vibration rapide (Réaumur, *Académie des sciences*, 1714.) Mais lorsque Muschenbroek ressentit pour la première fois les effets de la bouteille de Leyde, il eut l'heureuse idée de comparer cette commotion à celle de la torpille, et d'attribuer ainsi à la même cause des phénomènes dont l'origine semblait si différente : c'est alors seulement que la torpille et les autres poissons analogues, que l'on appelait en général *trembleurs*, furent appelés à juste titre *poissons électriques;* on en compte maintenant sept appartenant à des genres différents : *Torpedo narke risso; T. unimaculata; T. marmorata; T. galvanii; Silurus electricus; Tetraodon electricus; Gymnotus electricus.*

Quelle est l'origine de la prodigieuse quantité d'électricité que peuvent donner ces poissons? C'est une question d'un très-grand intérêt, qui paraît malheureusement avoir été négligée par les plus habiles observateurs : cependant nous sommes porté à admettre que cette électricité est le résultat d'une *action physiologique particulière;* car, dans l'ensemble des faits connus, nous ne trouvons rien qui autorise à penser qu'elle soit produite par des actions mécaniques, ou par la chaleur, ou par des actions chimiques analogues à celles que nous venons d'examiner : toutefois, dans l'impossibilité d'établir cette opinion sur des bases certaines, faute d'expériences directes, nous n'entreprendrons ici aucune discussion à ce sujet, et nous nous contenterons de ré-

sumer les principaux phénomènes qui ont été observés sur la torpille et le gymnote.

272. **Propriétés de la torpille.** — C'est à Walsh que nous devons les premières recherches un peu précises sur les effets de la torpille; ses expériences furent faites à la Rochelle, en 1772, et à l'île de Ré (*Journal de Physique*, t. IV, p. 205); il en tire les conséquences suivantes :

Quand la torpille est dans l'air, on reçoit la commotion en touchant directement une partie quelconque de sa peau, soit par un seul doigt, soit par toute la largeur de la main.

On reçoit pareillement les commotions lorsqu'on la touche avec un bon conducteur; par exemple, avec une tige de métal de plusieurs pieds de longueur.

La commotion est arrêtée par tous les mauvais conducteurs : ainsi, on peut toucher impunément la torpille avec du verre, de la résine, etc.

On peut même la toucher sans danger avec une petite bande d'étain collée sur du verre, pourvu qu'il se trouve dans l'étain une solution de continuité aussi petite qu'on puisse la faire avec la pointe d'un canif.

Quand plusieurs personnes *non isolées* se tiennent par la main, et que la première, seule, touche la torpille, la commotion se fait sentir à la seconde et même à la troisième, mais elle diminue d'intensité.

La commotion se fait sentir dans un cercle de vingt personnes non isolées qui se tiennent par la main, quand la première personne touche la torpille sous le ventre, tandis que la dernière la touche sur le dos, ou *vice versa*.

Voilà les principaux résultats que l'on obtient dans l'air; la dernière expérience réussirait peut-être en touchant deux points quelconques qui ne soient pas opposés, comme Walsh semble l'exiger, sans doute à cause de l'analogie qu'il cherche à établir entre les bouteilles de Leyde et les torpilles. Dans l'eau, les commotions ont toujours moins d'intensité que dans l'air, mais elles se produisent encore de la même manière et sous les mêmes conditions. L'eau étant un assez bon conducteur, on conçoit qu'une torpille vive et énergique puisse agir à distance, et qu'alors il ne soit pas nécessaire de la toucher directement. Walsh a en effet observé qu'elle *foudroie*, à distance, de petits poissons, ou au moins qu'elle les étourdit ou qu'elle les enivre.

Dans tous les cas, la commotion que lance la torpille est pour elle un phénomène volontaire : il arrive souvent qu'on la touche à plusieurs reprises sans rien obtenir ; mais, lorsqu'on l'irrite en lui pinçant les nageoires, on est à peu près assuré de recevoir des coups redoublés ; Walsh a compté jusqu'à cinquante décharges en une minute.

MM. Becquerel et Breschet ont fait plusieurs observations très-intéressantes sur les torpilles de Chioggia non loin de Venise (Becquerel, t. IV, p. 364) : ils ont constaté par exemple, au moyen d'un bon galvanomètre, que le courant va toujours du dos au ventre en passant par le galvanomètre ; ils ont pareillement vérifié de nouveau que la torpille peut faire à volonté passer la décharge par tels ou tels points de ses surfaces supérieures et inférieures.

M. Matteucci, qui a fait plus récemment encore des expériences très-curieuses sur les torpilles de l'Adriatique, a trouvé le moyen de rendre l'étincelle parfaitement visible : pour cela il applique deux armatures métalliques, l'une sur le dos et l'autre sur le ventre de la torpille ; puis il dispose en même temps deux feuilles d'or très-près l'une de l'autre, et dont chacune est mise en communication avec l'une des armatures : alors, aussitôt qu'on irrite la torpille, on voit briller l'étincelle entre les deux feuilles d'or.

M. Matteucci a pareillement confirmé l'observation importante de MM. Becquerel et Breschet sur le sens du courant ; il a constaté de son côté que le dos est positif, et le ventre négatif.

Nous regrettons de ne pouvoir donner de plus amples détails sur ces diverses recherches, qui jetteront sans doute beaucoup de jour sur les propriétés électriques et physiologiques de la torpille.

Propriétés du gymnote. — Le gymnote électrique, que l'on appelle aussi l'*anguille de Surinam*, est doué d'une puissance électrique encore plus grande que celle de la torpille. Walsh fit venir de Surinam des gymnotes, sur lesquels il confirma les résultats qu'il avait obtenus de la torpille quelques années auparavant ; mais, de plus, il fit cette observation curieuse, que la commotion du gymnote peut se transmettre d'un conducteur à un autre au travers d'une petite lame d'air, et qu'alors on voit briller une étincelle électrique. (*Journ. de Phys.*, t. VIII, p. 305.)

M. de Humboldt a fait, en Amérique, avec M. Bonpland, un grand nombre d'expériences sur le gymnote. Voici ce qu'il rapporte, dans son ouvrage, des habitudes de ce poisson singulier et des moyens de le pêcher :

« Nous partîmes, le 9 mars, de grand matin, pour le petit village de *Rastro de Abaxo :* de là, les Indiens nous conduisirent à un ruisseau qui, dans le temps des sécheresses, forme un bassin d'eau bourbeuse entouré de beaux arbres, de clusia, d'amyris, et de mimoses à fleurs odoriférantes. La pêche des gymnotes avec des filets est très-difficile, à cause de l'extrême agilité de ces poissons qui s'enfoncent dans la vase comme des serpents. On ne voulut point employer le *barbasco*, c'est-à-dire les racines du *piscidia erithryna*, du *jacquinia armillais*, et de quelques espèces de *phyllanthus*, qui, jetées dans une mare, enivrent ou engourdissent les animaux : ce moyen aurait affaibli les gymnotes. Les Indiens nous disaient qu'ils allaient *pêcher avec des chevaux*. Nous eûmes de la peine à nous faire une idée de cette pêche extraordinaire ; mais bientôt nous vîmes nos guides revenir de la savane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domptés ; ils en amenèrent une trentaine qu'on força d'entrer dans la mare.

« Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles, jaunâtres et livides, semblables à de grands serpents aquatiques, nagent à la surface de l'eau, et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets ; une lutte entre des animaux d'une organisation si différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, munis de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la mare ; quelques-uns d'entre eux montent sur les arbres, dont les branches s'étendent horizontalement au-dessus de la surface de l'eau ; par leurs cris sauvages et la longueur de leurs joncs, ils empêchent les chevaux de se sauver en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par la décharge réitérée de leurs batteries électriques ; pendant longtemps elles ont l'air de remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toutes parts dans les organes les plus essentiels à la vie ; étourdis par la force et la fréquence des commotions, ils disparaissent sous l'eau ; d'autres, haletants, la crinière hérissée, les yeux hagards et exprimant

l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend. Ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau. Cependant un petit nombre parvient à tromper l'active vigilance des pêcheurs; on les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre dans le sable, excédés de fatigue et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes.

« En moins de cinq minutes, deux chevaux étaient noyés. L'anguille, ayant cinq pieds de long et se pressant contre le ventre des chevaux, fait une décharge de toute l'étendue de son organe électrique : elle attaque à la fois le cœur, les viscères et le *plexus cœliacus* des nerfs abdominaux. Il est naturel que l'effet qu'éprouvent les chevaux soit plus puissant que celui que le même poisson produit sur l'homme lorsqu'il ne le touche que par une des extrémités. Les chevaux ne sont probablement pas tués, mais simplement étourdis. Ils se noient, étant dans l'impossibilité de se relever par la lutte prolongée entre les autres chevaux et les gymnotes.

« Nous ne doutions pas que la pêche ne se terminât par la mort successive des animaux qu'on y emploie. Mais peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue : les gymnotes fatigués se dispersent; ils ont besoin d'un long repos et d'une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de force galvanique : les mulets et les chevaux parurent moins effrayés, ils ne hérissaient plus la crinière, leurs yeux exprimaient moins d'épouvante ; les gymnotes s'approchaient timidement du bord des marais, où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes. Lorsque les cordes sont bien sèches, les Indiens, en soulevant le poisson en l'air, ne ressentent point de commotion. En peu de minutes nous eûmes cinq grandes anguilles, dont la plupart n'étaient que légèrement blessées; d'autres furent prises vers le soir par le même moyen.

« La température des eaux dans lesquelles vivent habituellement les gymnotes est de 26 à 27°. On assure que leur force électrique diminue dans les eaux plus froides; et il est assez remarquable en général, comme l'a déjà observé un physicien célèbre, que les animaux doués d'organes électromoteurs, dont les effets deviennent sensibles à l'homme, ne se rencontrent pas dans l'air, mais dans un fluide conducteur de l'électricité. Le gymnote est le plus grand des poissons électriques; j'en ai mesuré qui avaient cinq pieds à cinq pieds trois pouces de long. Les

Indiens assuraient qu'ils en avaient vu de plus grands encore. Nous avons trouvé qu'un poisson qui avait trois pieds dix pouces de long pesait douze livres. Le diamètre transversal du corps était (sans compter la nageoire anale, qui est prolongée en forme de carène) de trois pouces cinq lignes. Les gymnotes du *Cano de Bera* sont d'un beau vert d'olive : le dessous de la tête est jaune mêlé de rouge ; deux rangées de petites taches jaunes sont placées symétriquement le long du dos, depuis la tête jusqu'au bout de la queue ; chaque tache renferme une ouverture excrétoire : aussi la peau de l'animal est constamment couverte d'une matière muqueuse, qui, comme Volta l'a prouvé, conduit l'électricité vingt à trente fois mieux que l'eau pure. Il est, en général, assez remarquable qu'aucun des poissons électriques découverts jusqu'ici dans les différentes parties du monde ne soit couvert d'écailles. »

En opérant sur ces poissons, dont les batteries sont si puissantes, M. de Humboldt n'a pu découvrir aucune action directe sur les électromètres les plus sensibles, et aucun phénomène de lumière électrique.

De l'organe électrique. — Dans les divers poissons électriques, l'organe dans lequel se développe l'électricité a sensiblement la même texture et les mêmes apparences, quoique différent par sa forme, par sa grandenr et par sa disposition. Nous essayerons seulement de donner une idée de l'organe de la torpille, qui a été l'objet des recherches les plus précises. Cet organe se divise en deux parties symétriquement placées de chaque côté de la tête et appuyées contre les branchies ; elles occupent l'une et l'autre toute l'épaisseur qui sépare les deux plis de la peau. Lorsqu'on en fait la dissection, on voit qu'il est composé d'un tissu cellulaire extrêmement lâche, à grandes mailles, qui affecte la forme d'un cylindre ou plutôt d'un prisme de cinq à six pans. On en fait une comparaison sensiblement exacte, en disant qu'il ressemble aux alvéoles d'un rayon de miel ; seulement les cloisons ne sont pas de minces membranes, mais plutôt des fibres, séparées et tendues dans des sens différents.

On compte ordinairement dans chaque organe quatre à cinq cents de ces petits prismes, et il paraît que Hunter en a compté une fois jusqu'à onze cent quatre-vingt-deux. Ils sont à peu près perpendiculaires à la direction de la peau, à laquelle ils sont fortement adhérents par leurs deux extrémités. Si l'on observe en

détail la structure de chacun de ces prismes, on y distingue une foule de lames minces perpendiculaires à l'axe, séparées l'une de l'autre, et ajustées enfin comme les divers éléments d'une pile. Ces petits feuillets distincts, tantôt plans, tantôt ondulés, sont séparés par des couches muqueuses très-adhérentes ; mais, en pressant un organe, on ne peut faire sortir aucune quantité sensible de fluide.

Quatre faisceaux nerveux d'un grand volume viennent se distribuer dans l'organe, et, d'après M. Matteucci, le siége de la puissance électrique paraît être dans le renflement qui leur donne naissance.

Cette organisation a certainement des rapports frappants avec les piles de Volta, mais il faudrait des observations anatomiques plus précises, des expériences physiques et physiologiques plus nombreuses, pour porter jusqu'à l'évidence ces analogies qui se présentent d'une manière si séduisante; il faudrait surtout s'attacher à reconnaître si l'accumulation de l'électricité dans les organes électriques est le résultat d'une action physiologique volontaire, et distinguer, s'il y a lieu, les influences sous lesquelles l'appareil se charge, et les influences sous lesquelles il se décharge par des modes essentiellement différents. C'est là sans doute ce que des expériences ultérieures ne tarderont pas à nous apprendre.

CHAPITRE VI.

Lois générales de l'intensité des courants électriques.

Nous allons essayer de présenter dans ce chapitre les points les plus essentiels des recherches que nous avons faites sur la mesure des courants électriques, dans le but surtout de donner une idée des différents procédés d'expérimentation que nous avons employés, et de faire comprendre les lois générales auxquelles nous sommes parvenu. Nous traiterons séparément des courants thermo-électriques, des courants hydro-électriques, de la comparaison des sources électriques, et de la détermination de la quantité d'électricité qui est nécessaire pour décomposer un gramme d'eau.

Courants thermo-électriques.

273. L'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit qu'il traverse. — Lorsqu'on fait passer un courant thermo-électrique dans un circuit composé de fils de différents métaux et de différents diamètres, l'intensité du courant est toujours la même dans tous les points du circuit. Pour le démontrer, on peut disposer les différents fils du circuit horizontalement sur une ligne perpendiculaire au méridien magnétique, et faire osciller une même aiguille aimantée au-dessus des différents points que l'on veut examiner. Si l'on a soin, dans chaque expérience, de placer l'aiguille exactement au-dessus du fil et à la même distance de son axe, on trouve qu'elle fait partout le même nombre d'oscillations dans le même temps, d'où il résulte bien que l'intensité est partout la même.

On peut encore diriger le circuit dans le méridien magnétique et le ramener sur lui-même, en sorte qu'il y ait en chaque point deux courants contraires ; alors, en présentant une aiguille ordinaire de déclinaison en un point quelconque de cette double ligne, il est facile de reconnaître qu'elle n'est jamais déviée, et par conséquent que les courants contraires ont bien partout des intensités égales.

La source électrique qui nous paraît la plus commode pour

ces expériences et pour les suivantes est un cylindre de bismuth représenté (Pl. 22, Fig. 1), aux deux extrémités duquel on soude un fil de cuivre de 1 mètre de longueur ; l'une des soudures est maintenue, par exemple à 0, et l'autre à 100°, puis l'on complète le circuit arbitrairement avec des fils quelconques.

274. L'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section. — La source électrique restant la même, et le circuit étant aussi composé de la même substance, l'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section. Pour le démontrer, on prend deux cylindres pareils, coulés dans le même moule, et on les dispose comme le représente la figure 2 ; ensuite on choisit une bobine de fil de cuivre, bien homogène et couvert de soie ; on soude, à chaque bout des cylindres, un mètre de ce fil ; alors, pour reconnaître l'égalité des deux sources électriques, on fait passer leurs courants en sens inverse dans un galvanomètre différentiel (**246**) dont les fils soient parfaitement égaux. Si l'aiguille reste immobile, les sources sont égales, car les deux circuits sont identiques. Cela posé, on construit un autre galvanomètre avec du fil de la même bobine, en prenant deux bouts différents, l'un, par exemple, de 8 mètres, et l'autre de 98. Ces longueurs, ajoutées aux deux sources thermo-électriques, donneront deux circuits : l'un ayant une longueur totale de 10 mètres du même fil, plus la longueur du bismuth, qui peut être négligée comme nous le verrons plus loin ; l'autre, ayant une longueur totale de 100 mètres. Avec le circuit de 10 mètres on fait deux tours sur un cadre de multiplicateur, et vingt tours avec le circuit de 100 mètres; alors, en faisant passer les courants en sens inverse, l'aiguille reste immobile. Donc, le circuit 10 fois plus long est réellement 10 fois plus faible, puisqu'il doit agir par un nombre de tours 10 fois plus grand pour compenser l'effet du circuit le plus court. On peut comparer de même des circuits ayant entre eux des rapports quelconques de longueurs ; mais il faut que les fils soient bien homogènes, ce qui n'arrive pas toujours, car, sur la même bobine, on trouve parfois des parties voisines ayant des conductibilités notablement différentes.

C'est par le même procédé que l'on arrive à constater que l'intensité est proportionnelle à la section, soit en composant l'un des circuits avec trois ou quatre fils pareils, soit en pre-

nant un fil plus gros dont on a fait *tirer* une partie en fil plus fin, soit même, comme je l'ai fait, en laminant un fil pour montrer que la surface n'a aucune influence. Il est facile de reconnaître aussi que l'étendue de la soudure ne modifie pas les résultats, pourvu que tous ses points prennent bien la même température.

275. Conductibilité des différents métaux. — Pour déterminer la conductibilité relative des différents métaux, on se sert d'un galvanomètre différentiel très-sensible et des deux sources thermo-électriques égales de l'expérience précédente (Fig. 2). Soient *ab* et *cd* (Fig. 3) les bouts des cylindres de bismuth, *e* le galvanomètre différentiel, *f* une règle divisée de 2 ou 3 mètres de longueur, *g* un fil de platine tendu sur la règle, et *h* le fil d'épreuve dont on veut comparer la conductibilité à celle du fil de platine. Ces différents fils sont disposés comme on le voit sur la figure, et remplissent d'ailleurs les conditions suivantes :

1° Les courants des deux sources passent en sens contraire dans le galvanomètre ;

2° Les circuits seraient composés de la même manière et devraient être d'une égalité parfaite, si les longueurs du fil de platine et du fil d'épreuve étaient réduites à zéro ;

3° On peut changer à volonté la longueur du fil de platine, et c'est par là qu'on l'amène à affaiblir son courant autant que le fil d'épreuve *h* affaiblit le sien.

Pour remplir cette dernière condition, le fil de platine est disposé comme on le voit sur la figure 4 : le poids *p* lui donne une tension constante, et le curseur *i*, qui est un morceau de liége, le laisse passer dans une fente longitudinale ; mais le fil du galvanomètre se fixe avec un peu de cire sur le bord du curseur, et plonge avec le fil de platine dans le mercure qui remplit la cavité centrale. En déplaçant le curseur à droite ou à gauche, on diminue ou l'on augmente la longueur du fil de platine, et l'on arrive aisément à ramener au zéro l'aiguille du galvanomètre. Ce point une fois trouvé, il suffit de déplacer le curseur de quelques millimètres pour imprimer à l'aiguille une déviation sensible ; ainsi, on ne peut pas se tromper sur la longueur du fil de platine qui est capable d'équilibrer le fil d'épreuve.

Connaissant alors la section et la longueur du fil d'épreuve, la section et la longueur employées du fil de platine, il est facile de comparer leurs conductibilités : car, si ces fils ont le même

diamètre, leur conductibilité est évidemment proportionnelle à leur longueur; et, s'ils ont la même longueur, elle est en raison inverse des sections. En général, si l'on désigne par x la conductibilité du fil d'épreuve, par s' sa section et par l' sa longueur, puis par 1 la conductibilité du fil de platine, par s sa section et par l la longueur qu'il faut lui donner pour équilibrer le fil d'épreuve, on aura :

$$x = \frac{l'}{l} \cdot \frac{s}{s'}.$$

Les sections se déterminent avec une grande exactitude en mesurant au sphéromètre les diamètres des fils.

Comme le platine n'est jamais pur, il m'a semblé nécessaire de rapporter toutes les conductibilités à celle du mercure distillé. Pour cela on emploie au lieu du fil d'épreuve un tube de verre parfaitement cylindrique, et dont on détermine le diamètre par des pesées; les extrémités de ce tube *ab* (Fig. 11) viennent s'engager dans deux bouchons, ou plutôt dans deux vases de verre assez larges *c* et *d*, et l'expérience s'accomplit comme la précédente. Le tableau suivant contient les résultats qui ont été obtenus par ce procédé.

Tableau de la conductibilité des métaux.

Noms des substances.	Diamètre du fil.	Longueurs soumises à l'expérience.			Conductibilité.
	mill.	mill.	mill.	mill.	
Palladium	0,176	1900	1200	500	5791
Argent 963 de fin	0,174	2000	1500	200	5152
Argent 900 *id.*	0,194	*id.*	*id.*	*id.*	4753
Argent 857 *id.*	0,178	1200	800	400	4221
Argent 747 *id.*	0,179	1200	600	»	3882
Or pur	0,176	600	300	»	3975
Or 951 de fin	0,176	600	300	»	1338
Or 751 *id.*	0,176	400	200	»	714
Cuivre pur	0,182	2000	1000	500	3838
Id. recuit	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	3842
Platine	0,186	800	600	300	855
Laiton	0,182	»	»	»	200 900
Acier fondu	»	»	»	»	800 500
Fer	»	»	»	»	700 600
Mercure	»	»	»	»	100

Le palladium, le platine, l'or, l'argent et le cuivre, ont été purifiés à la Monnaie : je les dois à la bienveillante amitié de M. d'Arcet et de M. Bréant; les autres métaux ont été pris dans le commerce, ou préparés directement et alliés en diverses proportions.

On voit que le palladium est le plus conducteur des métaux; viennent ensuite l'argent, l'or et le cuivre : le mercure est le plus mauvais conducteur des corps que j'ai soumis à l'expérience; sa conductibilité est presque soixante fois moindre que celle du palladium.

La présence des substances étrangères altère singulièrement la conductibilité; ce serait un excellent moyen de reconnaître la pureté des métaux.

Le laiton, l'acier et le fer ont été soumis à un grand nombre d'expériences; j'ai rapporté seulement les limites entre lesquelles tous les résultats se trouvent compris.

La température n'a qu'une faible influence sur la conductibilité de certains corps : par exemple, de 0 à 100°, le mercure ne varie que de quelques centièmes : mais, entre les mêmes limites, le fer et l'acier éprouvent une prodigieuse variation; leur conductibilité est souvent réduite au tiers; la simple chaleur de la main produit des effets très-sensibles, et, ce qui semble encore plus étonnant, c'est qu'il suffit de faire rougir une étendue de quelques millimètres sur la longueur d'un fil de fer ou d'acier pour que sa conductibilité devienne trois ou quatre fois moindre.

La conductibilité du bismuth ne peut pas être déterminée avec une grande exactitude, parce qu'il est trop difficile d'en couler des tiges minces d'une grande longueur, surtout lorsqu'elles doivent être homogènes et de même diamètre; mais les essais que j'ai faits à cet égard m'ont démontré cependant que les cylindres pareils à celui de la figure 1 ne sont équivalents qu'à quelques centimètres d'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre : c'est précisément à cause de la mauvaise conductibilité du bismuth que j'ai été conduit à ne l'employer jamais qu'en cylindre d'une très-grande section, car c'est sous cette condition seulement qu'il est possible de négliger la longueur qu'il représente dans le circuit. Les cylindres ayant en effet 25 millimètres de diamètre et environ 300 millimètres de longueur, on voit que leur section est 2500 fois plus grande que celle d'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre; par conséquent, si le

bismuth avait la même conductibilité que le cuivre, le cylindre de 300 millimètres n'affaiblirait pas plus le courant qu'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur et de $\frac{3}{25}$ de millimètre de longueur; et si le bismuth avait une conductibilité 100 fois moindre que le cuivre, ce cylindre ne serait encore équivalent qu'à 12 millimètres d'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur.

Ces principes vont nous servir à exprimer par une formule très-simple l'intensité du courant produit par une source thermo-électrique quelconque, pourvu que l'on connaisse les sections, les longueurs et les conductibilités des différentes parties du circuit que ce courant doit traverser.

276. Intensité du courant dans un circuit simple et homogène. — L'intensité d'un courant thermo-électrique étant en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section et de sa conductibilité, il est évident que, si l'on présente à une même source thermo-électrique successivement deux circuits différents,

L'un ayant une longueur l, une section s, et une conductibilité c,

L'autre ayant une longueur l', une section s' et une conductibilité c',

On aura :

$$x = t \cdot \frac{s'}{s} \cdot \frac{c'}{c} \cdot \frac{l}{l'},$$

en désignant par t l'intensité du courant qui se développe dans le premier circuit, et par x celle du courant qui se développe dans le second, car le deuxième courant est égal au premier multiplié par le rapport direct des sections, par le rapport direct des conductibilités et par le rapport inverse des longueurs. En effet, il devient double ou triple du premier, si, les autres choses restant les mêmes, le rapport des sections est seulement double ou triple, ou si le rapport des conductibilités est seulement double ou triple, ou si le rapport des longueurs est seulement $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$, etc.

Ainsi, pour que le deuxième courant soit égal au premier, il suffit que l'on ait :

$$s' . c' . l = s . c . l',$$

condition qui peut être remplie d'une infinité de manières.

277. Intensité du courant dans un circuit simple et hétérogène. — Supposons, par exemple, que l'on présente à une même source thermo-électrique successivement deux circuits différents :

L'un homogène, ayant une longueur l, une section s et une conductibilité c ;

L'autre hétérogène, composé de diverses parties successives, c'est-à-dire formé, par exemple, avec un fil de cuivre, puis à la suite un fil d'or, puis un fil de fer, d'argent, de palladium, etc., etc.

Soient pour la 1re partie de ce circuit : l'' la longueur, s'' la section, c'' la conductibil. ;
Id. 2e *id.* l''' *id.* s''' *id.* c''' *id.*

Le courant d'intensité uniforme qui traverse toutes les parties et tous les éléments de ce circuit a la même intensité que s'il traversait un autre circuit homogène de longueur l', de section s', et de conductibilité c' ; et il est facile de trouver la longueur inconnue l' que devrait avoir ce nouveau circuit pour être rigoureusement équivalent au circuit hétérogène dont il s'agit, lorsqu'on suppose données la section s' et la conductibilité c'.

En effet, pour remplacer la première partie par un fil de section s' et de conductibilité c', il suffirait de donner à ce fil une longueur

$$l'' \cdot \frac{s' . c'}{s'' . c''},$$

car sa longueur doit être double de l'', s'il a une section double ou une conductibilité double, etc.

Cette longueur d'un fil de section s' et de conductibilité c', *équivalente* à la longueur l'', de section s'' et de conductibilité c'', c'est-à-dire, qui peut lui être substituée sans changer l'intensité du courant, est ce que nous appelons la *longueur réduite* de l'' ;

De même la longueur réduite de la deuxième partie sera :

$$l''' \cdot \frac{s' . c'}{s''' . c'''},$$

et il en est de même de toutes les autres.

Or, si les diverses parties successives avaient réellement été remplacées par des longueurs

$$l'' \cdot \frac{s' . c'}{s'' . c''}, \quad l''' \cdot \frac{s' . c'}{s''' . c'''}, \quad \text{etc.},$$

d'un fil de section s' et de conductibilité c', la longueur l' du nouveau circuit serait évidemment égale à la somme de ces longueurs.

On a donc

$$l' = \frac{l''.s'.c'}{s''.c''} + l'''.\frac{s'c'}{s'''c'''} + \text{etc.}$$

ou

$$l' = s'c'\left(\frac{l''}{s''c''} + \frac{l'''}{s'''c'''} + \text{etc.}\right).$$

Par conséquent, en désignant par t l'intensité du courant, dans le circuit de longueur l, de section s et de conductibilité c, et par x l'intensité du courant donné par la même source dans le circuit hétérogène dont il s'agit, l'on a :

$$x = t\frac{s'}{s}.\frac{c'}{c}.\frac{l}{l'};$$

et, si l'on prend $s' = s = 1$; $c' = c = 1$,

$$x = t\frac{l}{l'};$$

enfin, si l'on prend pour unité de longueur la longueur l', et pour unité d'intensité la valeur de t, l'on a

$$x = \frac{1}{\frac{l''}{s''c''} + \frac{l'''}{s'''c'''} + .}$$

Telle est la formule générale qui donne l'intensité du courant dans un circuit hétérogène quelconque, au moyen des longueurs des sections et des conductibilités des différents fils qui composent ce circuit.

278. Courants complexes ou dérivés. — Un courant est donné par un élément de bismuth et cuivre (Fig. 5), dont les soudures sont r et r'; il traverse d'abord le fil de cuivre *racbr'*, qui forme avec le bismuth un circuit simple; ensuite, avec un autre fil de cuivre *adb*, on vient établir des communications aux points a et b, et l'on se propose de déterminer tous les phénomènes d'intensité qui vont se développer par cette nouvelle addition que l'on fait au circuit. Il paraît naturel de supposer que le courant va se ramifier ou se décomposer au point a, qu'une partie continuera à passer directement de a en b par le premier fil c, tandis qu'une autre partie viendra prendre la nouvelle route qui lui est offerte par le fil additionnel *adb*.

Nous appelons les points a et b *points de dérivation*, et leur distance, comptée sur le fil, *distance* ou *intervalle de dérivation;* nous appelons de même le fil additionnel *adb fil de dérivation*, parce qu'il vient en quelque sorte *dériver* une portion du courant pour l'obliger à suivre une autre voie.

Nous appelons *courant primitif* le courant qui existait avant que la dérivation fût faite; *courant partiel*, la portion du courant qui passe actuellement par l'ancien fil *acb*, entre les points a et b; et *courant dérivé*, la portion du courant qui passe par le fil de dérivation *adb*.

Comme il est d'ailleurs probable que l'effet de la dérivation se fera sentir sur le courant primitif lui-même, pour en modifier l'intensité, nous appelons *courant principal* le courant qui passe dans tout le reste du circuit lorsque la dérivation est faite; ainsi le courant principal est celui qui remplace le courant primitif.

Désignons par t l'intensité du courant primitif,
par x celle du courant principal,
par y celle du courant partiel,
par z celle du courant dérivé.

Cela posé, pour trouver, d'une manière générale, les valeurs de x, de y et de z, c'est-à-dire les intensités du courant principal, du courant partiel et du courant dérivé, au moyen de l'intensité t du courant primitif, il reste à exprimer les conditions qui caractérisent ces diverses intensités; et ces conditions sont évidemment la longueur du circuit primitif, l'intervalle de dérivation, la longueur et la section du fil de dérivation, car nous admettrons, pour l'instant, que l'on n'emploie que des fils de même conductibilité.

Représentons donc en général par l la longueur totale du circuit primitif, en faisant entrer dans la valeur de l, si cela est nécessaire, la *longueur réduite* du cylindre de bismuth.

Représentons par nl la distance des points a et b, ou l'intervalle de dérivation; cet intervalle n'est jamais qu'une fraction plus ou moins grande de la longueur totale du circuit, et il importe de le rapporter à cette longueur, plutôt que de l'exprimer en mètres ou en longueur absolue. Ainsi n est toujours une fraction plus petite que l'unité, exprimant le rapport qu'il y a entre l'intervalle de dérivation et la longueur totale du circuit; n sera $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$, suivant que l'intervalle de dérivation sera $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{10}$ ou

$\frac{1}{100}$ de la longueur totale du fil *racbr'*, augmentée de la longueur réduite du cylindre de bismuth.

Représentons, d'après les mêmes principes, par *knl*, la longueur entière du fil de dérivation, désigné par *adb* sur la figure 5; ce qui signifie que cette longueur est égale à k fois l'intervalle de dérivation nl, en sorte que k peut être un nombre très-grand ou une fraction plus petite que l'unité; k sera, par exemple, égal à 100 ou à $\frac{1}{100}$, suivant que la longueur du fil de dérivation sera égale à 100 fois l'intervalle *ab* ou à $\frac{1}{100}$ de cet intervalle.

Représentons enfin par $\frac{s}{p}$ la section du fil de dérivation *adb*, s étant la section du fil *acb*; en sorte que p soit le rapport des sections de l'intervalle de dérivation et du fil de dérivation lui-même que nous supposons homogène dans toute sa longueur : p serait égal à 1, si les fils avaient le même diamètre; et il serait égal à 4, 9, 16, etc., si le fil de dérivation, plus fin que le fil *acb*, avait un diamètre $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc.

Ces définitions une fois établies, il est facile de trouver les valeurs de x, de y et de z; car il suffit pour cela d'appliquer les principes généraux à l'analyse des phénomènes qui se produisent.

En effet, le fil additionnel de longueur knl et de section $\frac{s}{p}$ produit sur le courant le même effet qu'un fil qui serait k fois plus court, et d'une section k fois plus petite; il pourrait donc être remplacé par un autre fil de longueur nl et de section $\frac{s}{kp}$, mais alors la communication entre les points a et b serait établie par deux fils de même longueur nl, et de sections différentes : le premier ayant une section s, le second, une section $\frac{s}{kp}$, ce qui est évidemment la même chose que si cette communication était établie par un seul fil de longueur nl et de section $s+\frac{s}{kp}=\frac{s(kp+1)}{kp}$, lequel fil peut, à son tour, être remplacé par un autre fil de longueur $nl.\frac{kp}{kp+1}$ et de section s.

Ainsi, l'effet de la dérivation est simplement de réduire l'intervalle de dérivation, qui était d'abord de longueur nl et de sec-

tion s, à n'être plus que de longueur $\frac{nl.kp}{kp+1}$ et de section s; par conséquent, après la dérivation, le circuit est le même que s'il avait une longueur $l-nl+\frac{nl\,kp}{kp+1}$ et une section s, ou une longueur $\frac{l(kp+1-n)}{kp+1}$ et une section s.

Le courant principal x et le courant primitif t, ayant la même section et des longueurs différentes, sont entre eux en raison inverse des longueurs l et $\frac{l(kp+1-n)}{kp+1}$ qui composent leurs circuits; on a donc enfin :

$$x=t.\frac{(kp+1)}{kp+1-n}.$$

Telle est la valeur du courant principal.

Maintenant, pour avoir les valeurs de y et de z, il suffit de remarquer qu'après avoir remplacé, comme nous l'avons fait, le fil de dérivation par un autre fil de longueur nl et de section $\frac{s}{kp}$, il est évident que la somme des intensités du courant partiel et du courant dérivé doit être toujours uniforme et toujours la même pour ses différents éléments; ce qui donne

$$y+z=x.$$

Il est pareillement évident que les intensités du courant partiel et du courant dérivé sont toujours entre elles comme les sections des fils dans lesquels ils passent, c'est-à-dire, comme la section s est à la section $\frac{s}{kp}$, ce qui donne

$$\frac{y}{z}=kp \quad \text{ou} \quad y=z.\,kp.$$

Au moyen de ces deux équations et de la valeur précédente de x, il est facile de voir que l'on a :

$$y=t.\frac{kp}{kp+1-n},$$
$$z=t.\frac{1}{kp+1-n}.$$

Ainsi, en dernier résultat, l'intensité x du courant principal,

l'intensité y du courant partiel et l'intensité z du courant dérivé, sont données par les trois équations fondamentales :

$$x = t \cdot \frac{(kp+1)}{kp+1-n},$$
$$y = t \cdot \frac{kp}{kp+1-n},$$
$$z = t \cdot \frac{1}{kp+1-n}.$$

Bien que ces formules soient des conséquences directes des principes que j'ai précédemment établis et démontrés sur les courants thermo-électriques, il m'a cependant semblé nécessaire de faire de nouvelles séries d'expériences extrêmement variées, soit pour confirmer encore le principe lui-même, soit pour démontrer qu'il s'étend bien réellement et sans exception à tous les cas possibles.

Remarques sur les formules précédentes.

Valeur de n. n exprimant, comme nous l'avons dit, le rapport qui existe entre l'intervalle de dérivation et la longueur totale du circuit, il en résulte qu'en général la valeur de n n'est pas donnée directement, et qu'il faut, pour la connaître, avoir déterminé d'avance les longueurs réelles du circuit entier et de l'intervalle de dérivation. Sur quoi il faut observer que l'intervalle de dérivation peut être compté de deux manières, savoir : au dehors de la source, ou en y comprenant la source elle-même. Ainsi, dans la figure 5, cet intervalle est simplement *acb*, si on le compte hors de la source; et il serait *arr'b*, si l'on y comprenait la source elle-même; mais il est facile de voir qu'il doit essentiellement être compté sans y comprendre la source.

D'après cela, si le circuit est, par exemple, de 100 mètres, et que la distance des points de dérivation soit seulement de $0^m,1$, on aurait :

$$n = 0,001.$$

Cette valeur de n peut alors être négligée, et les formules deviennent :

$$x = t,$$
$$y = t \cdot \frac{kp}{kp+1},$$
$$z = t \cdot \frac{1}{kp+1}.$$

Ainsi, dans ce cas, le courant principal est égal au courant primitif, c'est-à-dire, que le courant primitif n'est point altéré par la dérivation; mais le courant partiel et le courant dérivé conservent leur rapport général kp, qui dépend seulement des valeurs particulières de p et de k.

L'autre limite de la valeur de n est $n=1$; ce qui arrive quand on fait la dérivation aussi près de la source qu'il est possible, de manière que l'intervalle de dérivation soit égal au circuit lui-même; alors les formules générales deviennent :

$$x=t.\frac{(kp+1)}{kp},$$

$$y=t,$$

$$z=t.\frac{1}{kp},$$

c'est-à-dire que, dans ce cas, le courant partiel est égal au courant primitif, ou, en d'autres termes, que toute l'électricité qui passait dans l'ancien circuit y passe encore sans aucune modification, et que la source donne directement au fil additionnel de dérivation toute la quantité d'électricité qui convient à sa longueur, à sa section et à sa conductibilité.

Par conséquent, si la longueur du fil de dérivation est alors égale à l'intervalle de dérivation, c'est-à-dire, si l'on a $k=1$, il en résulte :

$$z=t.\frac{1}{p};$$

d'où il suit que le courant dérivé est lui-même égal au courant primitif pour $p=1$, qu'il est double pour $p=\frac{1}{2}$, etc., et que le courant principal ne cesse pas d'être égal à la somme du courant partiel et du courant dérivé; ce qui revient à dire, en dernier résultat, que l'intensité du courant est proportionnelle à la section du circuit, et cela doit être.

Entre ces deux limites n peut prendre toutes les valeurs possibles.

Valeur de k. Dans les applications, l'on connaîtra, en général, les éléments desquels se déduit la valeur de k, car on connaît la longueur en mètres du circuit qui fait dérivation. Cette longueur, dans nos formules, étant représentée par knl, on voit qu'il suffira de diviser par la longueur en mètres de l'intervalle de dérivation pour avoir la valeur de k; on voit pareillement

que cette valeur reste constante, lorsqu'on augmente dans le même rapport l'intervalle de dérivation et la longueur du fil de dérivation; pendant ces changements, les valeurs relatives du courant principal, du courant partiel et du courant dérivé, restent les mêmes; mais leurs valeurs absolues pourront être un peu différentes, si n ne reste pas très-petit.

Lorsque, la longueur du fil de dérivation restant la même, on fait diminuer de plus en plus l'intervalle de dérivation, k prend des valeurs qui croissent de plus en plus, et qui deviennent infinies quand l'intervalle devient nul, c'est-à-dire, quand les deux points de dérivation sont excessivement rapprochés l'un de l'autre; on a alors :

$$x = t,$$
$$y = t,$$
$$z = 0;$$

par conséquent, il n'y a plus de courant dans le fil de dérivation, lorsque ses deux extrémités touchent deux points très-voisins du circuit primitif.

Au contraire, à mesure que l'intervalle de dérivation augmente, le fil de dérivation restant toujours le même, les valeurs de k sont de plus en plus petites, et elles peuvent être très-près de 0 quand le fil de dérivation est très-court par rapport à l'intervalle de dérivation; on a alors :

$$x = t.\frac{1}{1-n},$$
$$y = 0,$$
$$z = t.\frac{1}{1-n};$$

par conséquent, il n'y a plus de courant partiel sensible; toute l'électricité passe dans le fil de dérivation, et le courant dérivé est égal au courant principal, qui se trouve lui-même beaucoup plus grand que le courant primitif, et d'autant plus grand que la valeur de n approche plus d'être égale à l'unité, ce qui doit être.

Valeur de p. p étant le rapport des sections du circuit primitif pris entre les points de dérivation et du fil de dérivation lui-même, on conçoit que la longueur totale du circuit doit essentiellement être évaluée en la ramenant à un fil homogène, qui aurait la conductibilité 1 et la section s du fil compris entre les points de dérivation; par conséquent, si le circuit est hétéro-

gène, il faut, avant tout, effectuer cette transformation pour avoir les valeurs de n, de k et de p.

Si l'on change en même temps et dans le même rapport les sections de l'intervalle de dérivation et du fil de dérivation, leurs longueurs restant les mêmes, la valeur de p reste constante, ainsi que la valeur de k; d'où il suit que les intensités relatives du courant principal, du courant partiel et du courant dérivé, restent les mêmes; mais leurs intensités absolues changent, parce que n change de grandeur.

Quand les valeurs de p et de k sont un peu grandes et que la valeur de n est petite, on a sensiblement :

$$z = \frac{1}{kp};$$

c'est-à-dire que dans ce cas le courant dérivé est proportionnel à la section du fil de dérivation.

Influence de la conductibilité. — C'est seulement pour simplifier que nous avons supposé, dans l'établissement des formules, que la conductibilité du fil de dérivation était toujours la même que la conductibilité du circuit entre les points de dérivation; si cette condition n'était pas remplie, il serait très-facile d'introduire dans les formules les modifications qui en résulteraient, car il suffirait de remarquer que, les effets de la conductibilité étant toujours les mêmes que les effets de la section, si l'on représente par c la conductibilité du circuit primitif, et par $\frac{c}{p'}$ celle du fil de dérivation, il y aurait à écrire partout dans les formules pp' au lieu de p.

Propriété remarquable des courants. — Les considérations qui précèdent nous conduisent à une propriété très-remarquable des courants électriques.

En effet, concevons un circuit thermo-électrique de dix mètres de longueur, formé par un cylindre de bismuth et par dix fils de la même substance mis bout à bout, ayant chacun un mètre de longueur, mais dont les sections soient différentes et croissent, par exemple, comme les nombres naturels 1, 2, 3, etc., 10; puis, supposons qu'avec un fil de même substance, ayant une longueur quelconque, de 20 mètres, par exemple, et une section égale à celle qui est prise pour unité, l'on vienne successivement faire une dérivation aux extrémités de chacun des dix

fils de 1 mètre qui composent le circuit. Il résulte des principes précédents que les valeurs de n seront différentes dans ces différents cas, mais elles seront toujours assez petites pour être négligées; k aura une valeur constante égale à 20, et p prendra des valeurs qui seront successivement 1, 2, 3, etc., 10. La dérivation se fait successivement aux extrémités des fils dont les sections sont 1, 2, 3, etc., 10; ainsi, le courant dérivé aura des intensités décroissantes qui seront :

$$\frac{1}{21}, \quad \frac{1}{41}, \quad \frac{1}{61} \quad \text{et} \quad \frac{1}{201}.$$

C'est en effet ce que l'expérience confirme, je l'ai vérifié directement pour des sections qui étaient entre elles comme 1 est à 5 : mais, quand le rapport des sections était plus grand, il aurait fallu faire un trop grand nombre de tours sur le cadre du multiplicateur avec le fil du courant dérivé, et alors je comparais son intensité à celle d'un courant thermo-électrique produit par un autre appareil, et dont l'intensité était par exemple $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{20}$ de celle du courant principal.

Ainsi, dans un circuit thermo-électrique composé de fils de différentes sections, la force élémentaire du courant est la même dans tous les points; et cependant lorsqu'on prend des intervalles égaux sur ces différents fils, les courants dérivés que l'on en tire ont des intensités différentes qui sont à peu près en raison inverse des sections des fils dans l'intervalle de dérivation. Cette loi s'applique exactement aux courants qui traversent des fils hétérogènes; mais alors il ne suffit plus de considérer les sections, il faut considérer aussi la conductibilité, en remarquant qu'un fil d'une certaine substance, ayant une section s' et une conductibilité c', produit exactement le même effet qu'un fil d'une autre substance ayant une section $\frac{s'c'}{c}$ et une conductibilité c', tellement que si la conductibilité c' est égale à $\frac{c}{2}$, la section du premier fil devra être double de celle du second pour produire le même effet. C'est ce qui a aussi été vérifié par l'expérience sur la plupart des substances qui peuvent être aisément réduites en fil. On obtient, par exemple, le même résultat en dérivant aux extrémités d'un fil de cuivre de 1 mètre et de 4 dixièmes de millimètre de diamètre, et aux extrémités d'un fil

de platine de 40 millimètres et de 182 millièmes de millimètre de diamètre.

Ainsi, sous la condition que l'on puisse négliger s par rapport à kp, l'on peut conclure en dernier résultat que l'intensité du courant dérivé est en raison directe de l'intervalle de dérivation, en raison inverse de la section du fil dans cet intervalle, et en raison inverse de sa conductibilité.

Dérivations multiples. — Lorsque, après avoir fait une première dérivation, l'on vient en faire une seconde dans une autre portion du circuit, il est facile de trouver les intensités du courant principal définitif, et celles des deux courants partiels et des deux courants dérivés. Ce sont ces dérivations, faites à côté les unes des autres, par des fils différents, dans différentes portions du circuit primitif, que nous appelons *dérivations multiples*. Nous ne nous arrêterons pas à développer les formules générales qui expriment alors les intensités des différents points du circuit, elles se déduisent aisément de ce qui précède.

279. Théorie du multiplicateur appliqué au courant thermo-électrique. — Les lois précédentes conduisent aussi à déterminer la disposition qu'il convient de donner au multiplicateur pour qu'il ait la plus grande sensibilité possible. Quelques exemples suffiront pour faire comprendre à cet égard les principes généraux, et pour montrer que la construction du multiplicateur est tout à fait subordonnée au reste du circuit auquel il doit s'appliquer.

1° S'il s'agit d'appliquer un multiplicateur à un circuit qui doive avoir par lui-même une grande longueur, il est nécessaire de donner au multiplicateur un grand nombre de tours, et de le composer avec un fil qui ne soit pas très-gros. Supposons, en effet, que le circuit soit, par exemple, équivalent à 100 mètres d'un fil de cuivre de $\frac{1}{20}$ de millimètre d'épaisseur, en ajoutant à ce circuit un multiplicateur composé avec 100 mètres du même fil, l'intensité du courant est seulement réduite à moitié, et avec ces 100 mètres on pourra faire sur le cadre un grand nombre de tours qui seront très-rapprochés, et qui agiront sur les aiguilles avec une grande efficacité. Si l'on ne donne au fil du multiplicateur que 10 mètres de longueur, l'intensité du courant est les $\frac{10}{11}$ de l'intensité primitive; elle se trouve par conséquent moins réduite que dans le cas précédent; mais aussi, avec 10 mètres, on fera 10 fois moins de tours qu'avec 100 mètres, et il est évi-

dent que 10 tours, dont chacun a une intensité $\frac{1}{2}$, produisent sur les aiguilles beaucoup plus d'effet qu'un seul tour dont l'intensité est $\frac{10}{11}$. Si, au contraire, on emploie à faire le multiplicateur un fil de 100 mètres ayant 1 millimètre d'épaisseur, cette addition ne change presque rien à l'intensité du courant ; car, à égale conductibilité, 10 mètres d'un millimètre d'épaisseur sont équivalents à 1 mètre d'un fil de $\frac{1}{10}$ de millimètre; le circuit devient donc de 101 mètres au lieu de 100; il semble en résulter que le fil de 1 millimètre d'épaisseur donnera un effet presque cent fois plus grand sur les aiguilles, mais, comme ses tours prendront une épaisseur considérable, ils n'agiront pas avec autant d'efficacité que les tours du fil de $\frac{1}{10}$ de millimètre. On peut d'après cela apprécier l'influence de la longueur et de l'épaisseur du fil; on voit même combien il serait facile de transformer ces principes en formules rigoureuses.

2° S'il s'agit d'appliquer un multiplicateur à un circuit qui n'ait par lui-même qu'une très-petite longueur, il faudra le composer avec un fil très-gros, et ne lui donner que très-peu de tours; c'est ce que l'on voit aisément par un raisonnement analogue au précédent.

Ainsi, en dernier résultat, lorsqu'on est maître de réduire à volonté la longueur du circuit auquel on veut appliquer un multiplicateur, il est vrai de dire que le multiplicateur ne multiplie pas; car, en supposant que le reste du circuit puisse être négligé, l est évident que, pour avoir dix tours au multiplicateur, il faudra donner à son fil une longueur décuple qui réduira l'intensité du courant à sa dixième partie, en sorte qu'avec un seul tour dix fois plus intense on aurait le même résultat.

280. Mesures des hautes températures. — J'ai essayé de mettre à profit les lois des courants thermo-électriques pour arriver à la construction d'un *pyromètre magnétique* qui pût servir à mesurer toutes les températures, depuis les plus grands degrés de froid jusqu'aux plus grands degrés de chaleur. Je dois donner ici une idée de cet appareil, qui se compose de deux parties distinctes, savoir : le pyromètre lui-même, et la *boussole pyrométrique*, qui sert à en marquer les indications.

Le *pyromètre* est représenté dans la figure 8 : *ab* est un tube de fer ou plutôt un canon de fusil; du milieu de la culasse *c* du fond, part un fil de platine qui est incorporé dans la masse

du fer et qui traverse l'axe du canon pour venir se souder à la pièce de cuivre rouge x ; de la culasse annulaire d part un second fil de platine qui vient se souder à la pièce de cuivre y ; le premier fil de platine est maintenu par un corps mauvais conducteur au milieu de l'ouverture de la culasse annulaire d, pour qu'il ne puisse pas la toucher ; f est une pièce de bois fixée sur le bout du tube et destinée à porter les deux pièces de cuivre x et y.

La *boussole pyrométrique* se compose d'un multiplicateur m (Fig. 9), formé avec un ruban de cuivre de 15 à 20 millimètres de largeur, et d'une aiguille de boussole ab (Fig. 10) posée sur un pivot au milieu du multiplicateur ; cette aiguille porte, perpendiculairement à sa longueur, une lame de bois cd sur laquelle on a tracé une ligne de repère qui sert à juger de la véritable position de l'aiguille elle-même. Le multiplicateur et son aiguille sont montés sur l'alidade mobile d'un cercle divisé. Quand le plan moyen du multiplicateur est exactement dans le méridien magnétique, l'appareil est au zéro, et le repère de l'index de l'aiguille tombe sous le fil d'une loupe ou d'une lunette qui est fixée au multiplicateur et qui l'accompagne dans tous ses mouvements. Si maintenant on vient faire passer un courant dans le multiplicateur, l'aiguille est déviée, et l'on tourne l'alidade qui porte le multiplicateur jusqu'à ce que le fil de la lunette arrive au repère de l'aiguille : le cercle fixe indique de combien de degrés on a dû marcher pour arriver à ce point, et c'est la mesure exacte de la déviation. En opérant de la sorte, on est bien assuré que l'aiguille a toujours la même position à l'égard du courant : c'est pour cela que j'appelle cette boussole une *boussole de sinus*, parce que l'intensité du courant est alors mesurée par le *sinus de la déviation*. En effet, soient cm le méridien magnétique (Fig. 6), c le centre de l'aiguille qui est aussi le centre de rotation, ca la position de l'aiguille, et d sa déviation : la composante de la force terrestre f qui est dirigée suivant at et qui tend à la ramener au méridien, est $f \sin d$; la force φ du courant agit toujours suivant az, ou perpendiculairement à l'aiguille, puisqu'il la suit dans ses mouvements jusqu'à ce que son plan vertical passe exactement par l'aiguille ; on doit donc avoir :

$$\varphi = f \sin d.$$

Ce moyen d'évaluer les intensités par les déviations est tout à la fois très-commode et très-rigoureux ; il m'a été d'un grand secours dans mes recherches.

La communication entre le pyromètre et sa boussole s'établit au moyen de deux fils de cuivre d'environ 1 millimètre de diamètre, terminés par des chevilles de cuivre qui viennent se planter d'une part dans les pièces x et y du pyromètre, et de l'autre part dans les extrémités du ruban dont se compose le multiplicateur de la boussole.

L'extrémité a du pyromètre est destinée à être la soudure chaude, et, pour que le fer ne s'altère pas au feu, on la couvre d'un lut réfractaire.

Cet instrument a été gradué au moyen du pyromètre à air que nous avons décrit (**132**), et les dimensions en ont été combinées pour qu'une différence de température de 100° centigrades corresponde à une déviation angulaire de 4 à 5°. Cette graduation reste exacte tant que l'appareil n'est pas soumis à des températures capables d'altérer le fer. On comprend que les indications de cette boussole sont indépendantes de l'état magnétique de l'aiguille, pourvu que ses pôles ne se déplacent pas d'une quantité trop considérable.

En opérant la graduation de plusieurs pyromètres analogues à celui qui vient d'être décrit, j'ai constaté ce fait remarquable, que l'intensité du courant est loin d'être proportionnelle à la température : la force électro-magnétique moyenne correspondant à chaque degré va en décroissant depuis la température ordinaire jusqu'à celle du *rouge naissant*, ensuite elle augmente pour reprendre à 1000° environ l'intensité qu'elle avait près de 0, et elle continue ainsi d'augmenter assez rapidement au delà de ce point. (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, décembre 1836.)

281. Intensité magnétique de la terre. — Si l'on peut parvenir à produire dans tous les temps et dans tous les lieux un courant électrique d'une intensité constante, il est évident que son action sur l'aiguille aimantée peut être comparée à l'action magnétique de la terre, et qu'elle en peut donner une mesure comparable très-rigoureuse ; il suffit pour cela de bien définir les conditions dans lesquelles on fait agir cette force électro-magnétique. Nous allons indiquer ici le courant constant qui nous semble le plus facile à obtenir, et les conditions sous

lesquelles on peut le faire agir d'une manière parfaitement assurée.

Le cuivre et le bismuth sont deux métaux qui peuvent être aisément obtenus à l'état de pureté, et qui ont en outre l'avantage de donner naissance par leur contact à un courant thermo-électrique très-énergique. La pureté du cuivre peut d'ailleurs être vérifiée *a posteriori*, car il suffit pour cela de comparer sa conductibilité à celle du mercure distillé. On peut donc regarder comme certain que du bismuth purifié et du cuivre éprouvé par sa comparaison avec le mercure donneront un courant parfaitement identique, lorsque ayant les mêmes dimensions ils auront juste aux deux soudures la même température, par exemple 0 et 100°. Les dimensions que j'ai adoptées sont : pour le bismuth le cylindre de la figure 1, ayant 20 millimètres de diamètre, 150 millimètres de longueur pour la partie droite, et 50 millimètres pour les deux appendices perpendiculaires; et pour le cuivre un fil de 1 millimètre de diamètre et de 20 mètres de longueur. Voilà le circuit rigoureusement défini ; et le courant qui en résultera sera parfaitement constant dans tous les temps et dans tous les lieux, lorsque la soudure froide sera mise à 0, et la soudure chaude à 100°.

Voici maintenant les conditions qui m'ont paru les plus convenables pour faire agir ce courant sur l'aiguille aimantée. J'ai fait pour le multiplicateur un cadre de laiton, représenté dans la figure 7 par une vue en dessus et par une coupe ; la partie extérieure sur laquelle s'enroule le fil a 200 millimètres de longueur dans sa partie droite, et les extrémités courbes sont des cercles de 15 millimètres de rayon; en sorte qu'un tour de fil correspond à une longueur à très-peu près de 500 millimètres.

Le fil de 20 mètres fait 20 tours sur le cadre, et il agit sur une aiguille de 1 décimètre qui est représentée dans la figure 7 entre les deux vues du cadre; elle est munie à chaque bout d'un index léger sur lequel on trace des repères; lorsqu'elle est posée sur son pivot comme on le voit dans la coupe, il est facile de la ramener exactement au même point. Le cadre est établi sur l'alidade mobile d'un cercle divisé de manière à composer une *boussole de sinus*. L'appareil étant au zéro, on met la soudure froide à 0° et la soudure chaude à 100°, puis l'on observe la déviation correspondante : à Paris, cette déviation est de 20° 15', et, dans les différents lieux de la terre, ou dans le même lieu à

différentes époques, les intensités du magnétisme terrestre seront entre elles en raison inverse du sinus de la déviation.

Cet appareil me paraît être le plus simple et le plus exact pour déterminer avec certitude l'intensité magnétique de la terre.

282. Diverses sources thermo-électriques. — La force électro-magnétique qui se développe au contact de deux métaux quelconques n'a pas encore été étudiée avec tout le soin qu'elle mérite; ainsi nous venons de voir qu'au contact du platine et du fer cette force est variable avec la température, et qu'elle a un minimum d'intensité moyenne qui correspond à la température du rouge naissant; d'autres expériences m'ont fait voir qu'au contact du bismuth et du cuivre cette force est parfaitement constante, c'est-à-dire proportionnelle à la température depuis 100° *au-dessus de zéro* jusqu'à 78° *au-dessous de zéro*, qui est la température d'un mélange d'éther et d'acide carbonique solide, température que j'ai déterminée simultanément par le pyromètre à air, par le pyromètre bismuth et cuivre, et par le thermomètre à alcool (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, avril 1837, t. IV, p. 514). M. Becquerel s'est livré aussi à un grand nombre d'expériences sur ce sujet (t. II, p. 46 et suiv.) : mais il reste encore beaucoup de recherches à faire pour déterminer avec précision les variations que la force électro-magnétique éprouve dans son intensité à diverses températures pour des métaux donnés, et surtout à comparer entre elles les intensités des courants qui sont produits par les diverses sources thermo-électriques.

283. Piles thermo-électriques. — Pour étudier les lois du développement de l'électricité dans les piles thermo-électriques, j'ai composé des piles de huit, de vingt-quatre et de trente-deux éléments, bismuth et cuivre : deux de ces éléments sont représentés dans la figure 12; la figure 13 représente une vue en dessus et une vue perspective de la pile de huit éléments; des vases de faïence, alternativement remplis de glace et d'eau chaude, servent à maintenir les soudures froides à 0 et les soudures chaudes à 60 ou 80°. Une petite aiguille aimantée suspendue à un fil de soie se dispose au-dessus du milieu d'un élément cuivre, et marque par ses oscillations l'intensité du courant qui passe dans la pile.

Il est facile par ce moyen de constater avec une grande exactitude ce résultat général qui avait déjà été indiqué par OErsted

et Fourier, savoir, que l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des éléments qui sont en activité ; mais on démontre de plus que, quel que soit le nombre des éléments d'une pile, quand ils sont *tous* mis en activité, l'intensité absolue du courant est exactement la même. Ainsi, le courant de la pile de trente-deux éléments a exactement la même intensité que le courant de la pile de vingt-quatre, et que le courant de la pile de huit, lorsque les différences de température sont égales, et l'on peut ajouter qu'il a la même intensité que le courant produit par une seule paire pour une même différence de température. Il en résulte que si l'on ne met en activité qu'une seule paire de la pile de trente-deux éléments, le courant n'est que la seizième partie de celui qui est produit par une seule paire ou par deux éléments : ce qui est une nouvelle confirmation de notre loi fondamentale, que l'intensité est en raison inverse de la longueur du circuit.

Voici encore un fait important que j'ai eu occasion d'observer, et dont la théorie des courants dérivés donne en même temps l'explication et la mesure.

Si dans la pile de huit éléments (Fig. 13) on chauffe seulement les deux soudures 1 et 4 au même degré, toutes les autres soudures étant à 0, on n'observe aucune apparence de courant dans la pile, ce qui doit être, puisque les soudures ne peuvent donner naissance qu'à des courants égaux et contraires; mais si l'on établit alors une communication vv' entre les deux éléments cuivre cd et ef, à l'instant cette traverse donne passage à un courant très-intense. Il en résulte cette conséquence remarquable, que les courants contraires résultant de l'élévation de température des deux soudures 1 et 4 ne se détruisent pas, mais que chacun d'eux circule comme s'il était seul. Pour mettre cette vérité hors de doute, il suffit d'observer l'intensité du courant vv' et de montrer, comme je l'ai fait, que cette intensité est précisément celle qui résulte de l'ensemble des courants dérivés contraires et inégaux qui doivent passer par la jonction vv'.

Ainsi les courants opposés ne se détruisent pas, ou plutôt ils ne réduisent pas les fluides électriques à l'état d'équilibre et de repos, mais chacun d'eux produit les mouvements propres qu'il produirait s'il était seul.

Les piles dont nous venons de parler ont été disposées dans le but de rechercher les lois fondamentales des courants; mais à

raison de leur masse et de leur volume, elles ne peuvent pas servir aux observations thermométriques. Parmi les piles qui ont été construites dans ce but particulier, celle de Nobili est sans contredit la plus ingénieuse et la plus sensible; elle est représentée dans la figure 14. Cette pile se compose de 25 ou 30 aiguilles de bismuth et d'antimoine, très-déliées, ayant environ 4 ou 5 centimètres de longueur; elles sont soudées, comme le représente la figure 15, de manière que toutes les soudures paires soient à un bout, et toutes les soudures impaires à l'autre bout; l'ensemble forme un petit faisceau compacte et solide à cause des substances isolantes qui séparent les aiguilles l'une de l'autre, car il ne faut pas qu'elles se touchent ailleurs qu'aux soudures; enfin, les deux *demi-éléments* qui terminent la chaîne viennent communiquer l'un à la cheville x et l'autre à la cheville y, qui forment ainsi les deux pôles de la pile.

Deux fils roulés en hélice lâche et couverts de soie établissent la communication entre les pôles de la pile et le multiplicateur.

Si l'on connaissait avec exactitude la conductibilité du bismuth et de l'antimoine, et la dimension des éléments de la pile, on pourrait aisément calculer la longueur d'un fil de cuivre d'épaisseur donnée qui représente le circuit de la pile, et conclure de là le nombre des tours qu'il est nécessaire de donner au multiplicateur pour avoir la plus grande sensibilité possible. A défaut de cette méthode directe, on pourrait employer une méthode indirecte en ajoutant successivement au circuit de la pile deux longueurs différentes du même fil de cuivre, et, en observant les intensités correspondantes, on en déduirait aisément que le circuit de la pile diminue l'intensité du courant autant que le ferait une longueur déterminée de ce fil. Mais de simples tâtonnements ont conduit à la construction d'un multiplicateur qui atteint le but avec une sensibilité suffisante. Nous verrons à l'article de la chaleur rayonnante les belles recherches qui ont été faites par M. Melloni au moyen de cet appareil, auquel il a donné le nom de thermo-multiplicateur.

Courants hydro-électriques.

284. Boussole de sinus et boussole de tangentes. — Les lois des courants hydro-électriques ne sont ni moins simples ni moins générales que celles des courants thermo-électriques; mais, pour les établir sur des mesures d'intensités suffisamment

précises, nous avons dû avoir recours à des instruments particuliers que nous avons nommés *boussole de sinus* et *boussole de tangentes ;* nous donnerons une idée de ces instruments.

Boussole de sinus. — Nous avons indiqué précédemment (**280**) le principe sur lequel repose la boussole de sinus, nous ajouterons seulement que nous avons dû faire usage de plusieurs appareils de cette espèce ayant des sensibilités différentes : pour augmenter la sensibilité, il suffit de rapprocher de l'aiguille le circuit qui doit agir sur elle ; pour la diminuer, au contraire, il suffit de l'éloigner ; enfin, le circuit peut être simple et ne faire qu'un tour, oomme il peut être multiple et représenter un véritable multiplicateur.

La figure 16 (Pl. 22) représente une boussole simple.

La figure 17 représente une boussole dont le circuit peut être à volonté simple ou multiple, car le cercle à gorge *abcd* est dégagé à sa partie inférieure *d* (Fig. 18), pour que l'on puisse passer aisément le fil qui porte le courant et augmenter ou diminuer à volonté le nombre des tours par lesquels il agit sur l'aiguille. Le diamètre du cercle est de $\frac{1}{3}$ de mètre, en sorte que chaque tour du fil est de 1 mètre.

J'ai employé d'autres boussoles de sensibilités différentes. La figure 21 représente celle de moyenne grandeur ; elle peut aussi être simple ou à multiplicateur ; le diamètre de son cercle est de 22 centimètres. Nous verrons plus loin comment les sensibilités de ces diverses boussoles peuvent être exactement comparées ; elles sont, comme nous l'avons dit, indépendantes de l'état magnétique de l'aiguille, pourvu que l'aiguille ait une force directrice suffisante.

Boussole de tangentes. — La boussole de tangentes est représentée dans la figure 20 ; elle se compose d'un grand cercle de 4 à 5 décimètres de diamètre qui est le cercle du courant ; il est formé par un ruban de cuivre de 20 millimètres de largeur et de 2 millimètres d'épaisseur ; ce ruban est revêtu de soie, et ses deux extrémités, repliées très-près l'une de l'autre pour se prolonger en dehors dans le sens du rayon, s'écartent ensuite pour plonger chacune dans un godet contenant du mercure. Le cercle du courant est disposé verticalement sur une espèce de banc qui est fendu au milieu de sa longueur pour le recevoir, et sur ce banc est établi un cercle divisé horizontal que doit parcourir une aiguille de boussole suspendue par un fil de soie

dans l'intérieur d'une cloche de verre qui repose aussi sur le banc lui-même : toutes ces pièces sont disposées pour que le centre de l'aiguille soit autant que possible au centre du cercle du courant, et par conséquent pour que la direction de l'aiguille coïncide avec le plan vertical du cercle, lorsque celui-ci est dirigé exactement dans le plan du méridien magnétique.

Les choses étant dans cet état, il est évident que, si l'on fait plonger les deux pôles d'une pile dans les godets pleins de mercure qui reçoivent déjà le pied du cercle, le courant passera dans le cercle et agira sur l'aiguille aimantée pour dévier le pôle austral à l'est ou à l'ouest; il est pareillement évident qu'il y aura un rapport déterminé entre la force du courant et l'angle de déviation de l'aiguille. Or, il est facile de voir que, si la longueur de l'aiguille est petite par rapport au rayon du cercle, l'intensité du courant sera mesurée par la tangente de la déviation : c'est pour cela que l'appareil peut être appelé *boussole des tangentes*. Cependant, s'il faut que l'aiguille soit courte sous ce rapport, il importe aussi qu'elle soit assez longue pour que l'on puisse aisément estimer un quart ou même un cinquième ou un sixième de degré. Pour remplir cette double condition, l'on a fixé l'aiguille aimantée, bien perpendiculairement, sur une longue aiguille de cuivre très-légère, dont les extrémités viennent courir sur les divisions du cercle divisé. Il faut que l'appareil soit parfaitement réglé, et pour cela il suffit d'examiner si les déviations des deux extrémités de l'aiguille de cuivre sont toujours égales entre elles, et si en faisant passer le courant dans un sens on obtient toujours le même résultat qu'en le faisant passer dans l'autre sens. Lorsque les angles atteignent 75 ou 80°, une erreur de 10′ sur la lecture correspondrait à une différence d'intensité trop considérable pour que l'on pût la négliger : ainsi, l'on ne peut regarder comme exactes que les indications qui sont inférieures à 75 ou 80° ; mais, comme il est possible d'estimer moins de $\frac{1}{2}$ degré, on voit que la boussole des tangentes peut servir à comparer des courants dont l'un est environ trois cents fois plus fort que l'autre.

285. Lois de l'intensité du courant produit par un élément. — L'élément hydro-électrique que nous avons employé dans ces recherches, est représenté (Pl. 23, Fig. 24); c'est l'élément de Daniell, que nous décrirons plus loin (chap. vii); il a été préféré parce qu'il était alors le seul qui possédât une force

constante, et qui permît par conséquent d'établir les lois sur des données précises. Le courant de l'élément arrive à la boussole par deux fortes tiges de cuivre *c* et *d* (Pl. 22, Fig. 20), ayant environ 1 centimètre de diamètre et $\frac{1}{2}$ mètre de longueur.

Pour déterminer la loi suivant laquelle diminue l'intensité à mesure qu'on augmente la longueur du circuit, on fait, avec un *même* fil, des séries de longueurs différentes, par exemple, 5^m, 10^m, 40^m, 70^m, et 100 mètres; lorsque ces fils sont couverts de soie, on les enroule en couronne (Pl. 22, Fig. 19) et on les enveloppe d'un ruban, de manière que les deux extrémités *a* et *b*, recourbées en crochet, puissent aisément plonger dans les godets de mercure. Il n'est pas inutile de les amalgamer d'avance.

On procède ensuite de la manière suivante :

On fait passer le courant directement dans la boussole, et l'on observe la déviation, puis l'on introduit successivement dans le circuit tous les fils de la série, en notant soigneusement les déviations correspondantes.

Voici, par exemple, le résultat d'une observation :

Longueurs ajoutées au circuit.	Déviations observées.	Tangentes des déviations.
0^m	62° 00′	1,880
5	40 20	0,849
10	28 30	0,543
40	9 45	0,172
70	6 00	0,105
100	4 15	0,074

On n'observe d'abord aucune espèce de régularité dans la marche décroissante que prennent les intensités à mesure que la longueur du fil augmente; mais, si l'on réfléchit que le fil ajouté au circuit primitif n'est pas le seul obstacle que le courant ait à vaincre, et qu'il faut compter aussi pour quelque chose le liquide de l'élément lui-même, le cercle de la boussole et les différents conducteurs qui servent à compléter les communications, l'on sera conduit à supposer que l'ensemble de ces résistances diverses, que j'appelle *résistance de l'élément*, peut être représenté par une certaine longueur inconnue x du fil lui-même, qui a été ajouté au circuit; en sorte qu'en réalité les longueurs du circuit, les déviations observées et les tangentes de ces déviations donnent le tableau suivant :

Longueurs du circuit.	Déviations observées.	Tangentes des déviations.
x	62° 00′	1,880
$x+5$	40 20	0,849
$x+10$	28 30	0,543
$x+40$	9 45	0,172
$x+70$	6 00	0,105
$x+100$	4 15	0,074

S'il est vrai, maintenant, que les intensités des courants hydro-électriques soient en raison inverse des longueurs du circuit, comme les intensités des courants thermo-électriques ; il sera facile de tirer de ces résultats la valeur de x, qui alors devra être constante. Or, en comparant d'après ce principe la première observation avec chacune des suivantes, on en tire en effet des valeurs de x très-peu différentes l'une de l'autre ; ces valeurs sont : $4^m,11$; 4,06 ; 4,03 ; 4,14 ; 4,09 ; dont la moyenne est 4,08.

Ainsi la résistance de l'élément est exprimée par $4^m,08$ du fil de cuivre dont les longueurs différentes ont été ajoutées au circuit. En adoptant cette longueur et la loi générale des intensités en raison inverse de la longueur totale du circuit, l'on peut aisément calculer les déviations qui auraient dû être obtenues, et les comparer à celles que l'observation directe a données.

Voici le tableau des résultats :

Longueurs du circuit.	Déviations calculées.	Déviations observées.	Différence.
$4^m,08$	62° 00′	62° 00′	
9 ,08	40 18	40 20	+ 2′
14 ,08	28 41	28 30	— 11
44 ,08	9 56	9 45	— 11
74 ,08	5 57	6 00	+ 3
104 ,08	4 14	4 15	+ 1

Une telle coïncidence entre les résultats directs de l'observation et ceux qui se déduisent de la loi générale appliquée aux courants hydro-électriques, ne peut laisser de doute sur l'exactitude de cette loi.

Je ne cite ici qu'un exemple pour donner une idée de la méthode d'observation ; mais je dois ajouter que les expériences ont été variées autant que pouvait l'exiger l'importance du sujet, que de nombreuses séries ont été faites avec des éléments très-énergiques ou très-affaiblis, et avec des fils très-bons et très-mauvais conducteurs, comme l'or, l'argent, le platine, le laiton et le fer. J'ajouterai seulement que les fils de fer ou de laiton,

quoique pris bout à bout dans la même pièce, n'ont pas toujours une conductibilité constante, et que tous les résultats n'offrent pas une concordance aussi parfaite que ceux que nous venons de rapporter; mais, lorsqu'on prend la peine d'observer directement la conductibilité et d'en tenir compte, toutes les petites irrégularités disparaissent.

Lorsque la résistance d'un élément est une fois déterminée au moyen d'un fil dont on connaît la section et la conductibilité, il est facile de trouver le nombre qui doit l'exprimer lorsqu'on emploie aux expériences un autre fil quelconque : cette résistance, par exemple, qui est 4,08 pour le fil de l'expérience précédente, serait 408^m pour un fil de même diamètre dont la conductibilité serait 100 fois plus grande, etc., etc. On peut même, comme je l'avais fait autrefois, employer ce moyen pour déterminer la conductibilité relative des différents métaux; mais les éléments ordinaires à la Wollaston ou en hélice, que j'employais alors, éprouvent de telles variations d'intensité, qu'il est impossible en les employant de démontrer la loi dont il s'agit avec une précision suffisante.

Il résulte enfin de ces observations que, pour les sources hydro-électriques comme pour les sources thermo-électriques, l'intensité du courant est en raison directe de la section et de la conductibilité, et en raison inverse de la longueur totale; mais cette longueur totale n'est point la longueur apparente : c'est la longueur de toutes les diverses parties du courant, réduites à une même section et à une même conductibilité par les principes que nous avons développés (**276**).

286. Courants dérivés. — Les formules des courants dérivés que nous avons établies précédemment (**278**) s'appliquent sans aucune restriction aux courants hydro-électriques, lorsqu'on a déterminé, comme nous venons de le faire, la résistance de la source qui donne naissance au courant; seulement, il faut avoir soin d'exprimer la longueur totale du circuit en y faisant entrer cette résistance avec la valeur numérique qu'elle doit avoir d'après la section et la conductibilité que l'on choisit, pour exprimer les longueurs de toutes les autres parties du circuit.

Les résultats de ces formules sont ici beaucoup plus faciles à vérifier, parce que les courants ont une intensité beaucoup plus grande; les appareils dont je me suis servi pour ces vérifications sont des boussoles de sinus ou de tangentes analogues à celles qui

sont représentées (Fig. 16, 17, 20, 21), mais ayant des sensibilités différentes, suivant les intensités qu'il s'agissait d'observer.

287. Lois de l'intensité des courants produits par une pile. — Les piles qui m'ont servi dans ces recherches ont été composées avec des éléments analogues à celui qui est représenté (Pl. 23, Fig. 24); on les a disposés d'une manière convenable pour observer chacun d'eux séparément : nous citerons ici une seule série d'expériences faites avec une pile de 6 éléments pour indiquer la marche qui a été suivie.

On a déterminé d'abord l'intensité individuelle et la résistance de chaque élément.

Voici le tableau des résultats :

NUMÉROS des ÉLÉMENTS.	LONGUEURS ajoutées A L'ÉLÉMENT.	DÉVIATIONS OBSERVÉES.	TANGENTES ou INTENSITÉS.	RÉSISTANCES.
				m.
1	0m	69° »'	2,600	», »
	5	43 20	0,943	2,85
	10	30 »	0,577	2,85
	40	11 »	0,194	3,20
			Moyenne......	2,97
2	0	66 30	2,300	», »
	5	43 »	0,933	3,41
	10	29 40	0,570	3,35
	40	10 40	0,188	3,55
			Moyenne......	3,44
3	0	67 40	2,434	», »
	5	42 30	0,916	3,02
	10	29 40	0,570	3,05
	40	10 20	0,182	3,23
			Moyenne......	3,10
4	0	67 »	2,355	», »
	5	42 30	0,909	3,19
	10	29 40	0,570	3,19
	40	10 20	0,182	3,35
			Moyenne......	3,25
5	0	68 »	2,475	», »
	5	43 20	0,943	3,08
	10	30 30	0,589	3,13
	40	11 »	0,194	3,40
			Moyenne......	3,21
6	0	64 »	2,050	», »
	5	41 »	0,869	3,68
	10	28 40	0,548	3,64
	40	10 »	0,176	3,75
			Moyenne......	3,69

Ainsi, ces éléments avaient à peu près la même force : à l'exception cependant du sixième, qui était un peu plus faible.

Les communications ayant été établies entre tous les éléments, on a eu une pile dont l'intensité était telle qu'elle pouvait porter au rouge un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre; et de plus de 20 centimètres de longueur.

On a fait ensuite passer par la boussole des tangentes le courant qu'elle pouvait produire, et l'on a obtenu les résultats suivants avec le fil de cuivre des expériences précédentes.

LONGUEURS AJOUTÉES.	DÉVIATIONS OBSERVÉES.	TANGENTES DES DÉVIATIONS.	RÉSISTANCES.
			m.
0m	68° 30′	2,538	», »
5	63 20	1,991	18,20
10	58 30	1,632	19,03
40	39 »	0,810	18.01
70	28 »	0,532	18.56
100	21 30	0,394	18,38
		Moyenne..........	18,43

Ces résultats remarquables prouvent d'abord que l'intensité du courant produit par une pile de six éléments est moindre en apparence que l'intensité du courant produit par l'élément le plus fort, car l'élément n° 1 avait donné une déviation de 69°, et la pile entière ne donne qu'une déviation de 68° 30′.

Ces résultats font voir ensuite que la résistance d'une pile est beaucoup plus grande que celle de chacun de ses éléments, mais que son intensité reste soumise à la loi générale, c'est-à-dire qu'elle est, comme pour un simple élément, en raison inverse de la longueur totale du circuit.

Mais il reste à trouver le rapport qui ne peut manquer d'exister entre l'intensité de la pile et celle de ses divers éléments constitutifs. Pour cela, nous remarquerons d'abord que si l'on ajoute bout à bout divers éléments pour en composer une pile, le courant de l'élément n° 1 n'a plus à traverser seulement la longueur de son circuit et celle de la boussole, mais qu'il doit traverser en outre tous les autres éléments, et par conséquent s'affaiblir proportionnellement à la longueur qui représente la

esistance de ces éléments; qu'il en est de même de l'élément ° 2, et de tous les autres.

Par conséquent, si l'on représente par

t_1 et r_1 l'intensité et la résistance individuelle du 1[er] élément,
t_2 et r_2 . . . . du 2[e] élément,
t_3 et r_3 . . . . du 3[e] élément,
etc., etc., etc.,

ces résistances étant déterminées comme il a été dit précédemment, il est clair que le courant de l'élément n° 1, lorsqu'il entre dans la pile, aura à traverser sa propre longueur r_1, puis la longueur $r_2 - a$, en représentant par a la longueur de la boussole et des conducteurs communs, qui doit se retrancher de la longueur r_2; puis il aura à traverser ensuite la longueur $r_3 - a$ du troisième élément, la longueur $r_4 - a$ du quatrième élément, et enfin la longueur l du circuit ajouté; en sorte qu'en dernier résultat, le courant de l'élément n° 1 aura à traverser une longueur exprimée par

$$r_1 + r_2 + r_3 + \ldots + r_n - a(n-1) + l,$$

ou par

$$\Sigma r - a(n-1) + l,$$

en désignant par Σr la somme des quantités semblables, $r_1 + r_2 + \ldots r_n$.

Or, si pour une longueur r_1 son intensité est t_1, il est évident que, pour une longueur $\Sigma r - a(n-1) + l$, son intensité sera :

$$\frac{r_1 t_1}{\Sigma r - a(n-1) + l}.$$

Par la même raison, l'intensité du deuxième élément sera exprimée par

$$\frac{r_2 t_2}{\Sigma r - a(n-1) + l},$$

celle du troisième par

$$\frac{r_3 t_3}{\Sigma r - a(n-1) + l},$$

en sorte que la somme des intensités de tous les éléments de la pile sera, en dernier résultat, exprimée par

$$\frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1) + l},$$

en désignant par Σrt la somme des produits semblables $r_1 t_1 + r_2 t_2 +$ etc., etc.

Telle est donc la formule générale qui exprime l'intensité d'une pile au moyen des intensités individuelles de ses éléments.

Pour en faire l'application à l'expérience précédente, il suffit de connaître la valeur a; car on a, dans le premier tableau, les six valeurs de r et de t pour chaque élément, et dans le second, les différentes valeurs de l. Les dimensions connues du ruban de cuivre et des deux grosses tiges de cuivre qui servent à la communication permettent de conclure que a est à peu près égal à $0^m,26$, en l'exprimant en longueur de même espèce que le fil qui a servi à déterminer la résistance; ainsi

$$(n-1)a = 5.0^m,26 = 1^m,30.$$

On voit d'ailleurs, par le premier tableau, que la somme des résistances individuelles observées est 19,66 : ainsi

$$\Sigma r - a(n-1) = 19,66 - 1,30 = 18,36.$$

On voit par les valeurs de r_1 et de t_1, de r_2 et de t_2, etc., consignées dans le même tableau, que Σrt est égal à 46,343.

Par conséquent, l'intensité de la pile est exprimée par :

$$\frac{46,343}{18,36 + l}.$$

Or, en calculant ces intensités, pour $l = 0$, $l = 5$, $l = 10$, $l = 40$, $l = 70$, $l = 100$, et en comparant ces résultats calculés aux résultats observés, après être remonté des tangentes aux angles, on obtient le tableau suivant :

Longueurs ajoutées.	Déviations observées.	Déviations calculées.	Différence.
0	68° 30′	68° 23′	+ 7′
5	63 20	63 15	+ 5
10	58 30	58 33	— 3
40	39 00	38 30	+30
70	28 00	27 42	+18
100	21 30	21 25	+ 5

Si l'on se reporte maintenant à toutes les expériences individuelles dont les éléments sont entrés dans ce calcul définitif, on ne se refusera pas sans doute à admettre comme complétement satisfaisant cet accord du calcul et de l'expérience, et, par

conséquent, à regarder comme rigoureusement démontrés les principes d'après lesquels on a pu parvenir à exprimer par une formule générale l'intensité d'une pile au moyen des intensités individuelles de ses éléments. Au reste, ce n'est qu'après avoir fait un grand nombre d'autres séries d'expériences, toutes également concluantes, que la formule générale a pu nous inspirer une entière confiance.

Nous ajouterons seulement qu'il ne faut jamais employer des fils qui puissent s'échauffer d'une manière trop sensible par l'effet du courant de la pile, parce que leur conductibilité étant altérée par le changement de température, ils doivent être alors assimilés à des fils de substances différentes, et leurs longueurs réelles ne sont plus représentées par leurs longueurs apparentes.

Il est, au reste, bien entendu que, pour les piles comme pour les éléments, les intensités observées ne sont en raison inverse des longueurs des circuits que quand ces circuits sont composés de fils homogènes de même section et de même conductibilité : dans le cas contraire, il faut, comme nous l'avons indiqué, prendre les *longueurs réduites*, c'est-à-dire ramenées par le calcul à une même section et à une même conductibilité.

Nous pouvons reprendre maintenant la formule générale précédente pour indiquer rapidement quelques-unes des nombreuses conséquences qui peuvent s'en déduire.

Première conséquence. Puisque l'intensité d'une pile est représentée en général par

$$\frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1) + l},$$

il en résulte qu'elle est toujours en raison inverse de la longueur du circuit, comme nous l'avons reconnu par l'expérience, et il en résulte, de plus, qu'il est toujours possible de concevoir un seul élément doué de telles propriétés qu'il reproduise exactement à lui seul tous les phénomènes de la pile.

En effet, soient ρ la résistance d'un tel élément, et τ son intensité, lorsque son courant ne traverse que son propre circuit ρ; lorsque son courant traversera, en outre, la longueur l du fil ou du conducteur qui a servi à exprimer la résistance, son intensité sera exprimée par

$$\frac{\rho\tau}{\rho + l}$$

et si cet élément peut produire tous les phénomènes de la pile, il faudra que l'équation

$$\frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1) + l} = \frac{\rho\tau}{\rho + l},$$

puisse toujours se vérifier indépendamment de la valeur de l; et c'est la seule condition qui doive être remplie. Or, cette condition se remplit par les deux équations

$$\rho = \Sigma r - a(n-1),$$

et

$$\tau = \frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1)}.$$

Si l'on pouvait donc, au moyen de quelque réaction chimique, ou de toute autre cause capable de développer de l'électricité, parvenir à composer un élément dont la résistance propre fût égale à $\Sigma r - a(n-1)$, cet élément pourrait produire tous les effets de la pile; car, en augmentant les surfaces ou en employant quelque autre moyen, on arriverait sans doute à lui donner une tension telle qu'elle pût satisfaire à l'autre relation

$$\tau = \frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1)}.$$

Alors, dans tous les cas, cet élément se conduirait comme une pile, et produirait partout les mêmes effets.

Deuxième conséquence. Si tous les éléments ont la même force, la formule générale devient :

$$\frac{nrt}{nr - a(n-1) + l}.$$

Si a est très-petit par rapport à r (et l'on peut toujours disposer les appareils pour qu'il en soit ainsi), la formule se simplifie encore et devient :

$$\frac{nr}{nr + l}.$$

Enfin, si l'on fait $l = pr$, c'est-à-dire si le conducteur traversé par le courant est exprimé par p fois la résistance d'un élément, l'intensité de la pile se réduit à :

$$\frac{nt}{n + p}.$$

Par conséquent, si p est petit par rapport à n, ce qui arrive

lans une pile d'un grand nombre d'éléments dont le courant raverse des conducteurs d'une grande section et d'une grande conductibilité, l'intensité se réduit à :

$$\frac{nt}{n}=t;$$

c'est-à-dire que, dans ce cas, l'intensité de la pile n'est pas plus grande que celle d'un seul élément.

Au contraire, si p est très-grand par rapport à n, ce qui arrive quand le courant de la pile doit traverser quelques liquides, ou seulement de très-grandes longueurs d'un fil délié ou mauvais conducteur, et lorsqu'en même temps la valeur de r est petite, c'est-à-dire lorsque le liquide de la pile est très-bon conducteur, alors l'intensité est exprimée par

$$\frac{nt}{p},$$

c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle au nombre des éléments.

Ces deux cas extrêmes sont les deux limites entre lesquelles l'intensité d'une pile quelconque est essentiellement renfermée. Ainsi, dans le cas le plus défavorable, l'intensité de la pile n'est ni plus ni moins grande que celle d'un élément; dans le cas le plus favorable, elle est proportionnelle au nombre des éléments; enfin, dans les cas ordinaires, elle a une valeur intermédiaire et comprise entre ces limites.

La tension du courant n'est donc, en dernier résultat, que la faculté de traverser un *long circuit* sans diminuer trop rapidement d'intensité; et, quand nous parlons d'un long circuit, il faut, comme toujours, entendre la longueur réelle et non la longueur apparente. S'il s'agit, par exemple, d'un circuit d'eau acidulée de quelques millimètres de longueur, il faut bien comprendre que ce circuit exprimé en longueur de fil, vaudra peut-être quelques millions de mètres, suivant la conductibilité et la section du fil que l'on aura choisi pour exprimer les résistances des éléments.

288. Loi de l'intensité d'un courant produit par plusieurs éléments réunis pôle à pôle. — Lorsqu'on réunit deux éléments pôle à pôle pour faire ensuite passer le courant qui en résulte dans un circuit quelconque, il est facile de déterminer par les mêmes principes l'intensité du courant lorsqu'on connaît l'inten-

sité et les résistances individuelles des éléments : il suffit, pour cela, de remarquer qu'en considérant le premier élément comme seul actif, le deuxième élément donne passage à un courant dérivé dont on peut trouver l'intensité; ensuite, en considérant à son tour le deuxième élément comme seul actif, le premier élément donne passage alors à un courant dérivé dont l'intensité peut aussi être calculée. Ces calculs n'ont rien de difficile, d'après ce que nous avons dit précédemment; mais ils sont trop longs pour que nous puissions les indiquer ici; nous donnerons seulement la formule générale qui en résulte, et qui représente l'intensité d'une pile de cette espèce, composée de n éléments dont les intensités et les résistances sont exprimées par t_1, r_1, t_2, r_2, etc. Cette formule est la suivante :

$$\frac{r_1 r_2 \ldots r_n (t_1 + t_2 + \ldots t_n)}{r_1 r_2 \ldots r_n + a(r_2 r_3 \ldots r_n + r_1 r_3 \ldots r_n + \text{etc.}\, r_1 r_2 \ldots r_{n-1})}.$$

a représente la longueur du fil ajouté au circuit, et toutes les résistances doivent être exprimées en longueur de ce fil.

Lorsque tous les éléments sont égaux, et pour leur résistance et pour leur intensité, cette formule devient :

$$\frac{rnt}{r + na};$$

et, si l'on suppose que la longueur additionnelle a soit représentée par pr, on a enfin :

$$\frac{nt}{1 + np}.$$

Or, un seul élément pour la même longueur additionnelle pr, aurait une intensité exprimée par

$$\frac{1}{1 + p};$$

d'où il résulte qu'entre une pile de n éléments et un seul élément de même force, il y a un rapport d'intensité qui est exprimé par :

$$\frac{n + np}{1 + np}.$$

Ainsi, quand l'on n'ajoute rien au circuit, p étant égal à 0, ce rapport est égal à n, c'est-à-dire que l'intensité du courant de la pile est proportionnelle au nombre des éléments n; au con-

traire, quand p est très-grand, le rapport se réduit à l'unité, c'est-à-dire que l'intensité du courant de la pile est, alors seulement, égale à celle de l'un des éléments.

Ce résultat explique pourquoi les piles à grande surface et à petite tension ne peuvent en général produire aucune action chimique; car, aussitôt que le courant doit passer par un mauvais conducteur, qui est, par conséquent, exprimé par une très-grande longueur de fil, la réunion pôle à pôle de plusieurs éléments ne peut, à cause des dérivations, rien donner de plus qu'un seul élément.

Tous les phénomènes extrêmement variés que présentent ces systèmes de piles ont été vérifiés par des expériences analogues aux précédentes.

Comparaison des différentes sources électriques, et détermination de la quantité d'électricité qui est nécessaire pour décomposer un gramme d'eau.

289. Rapport de conductibilité des liquides et des métaux. — Pour arriver à la comparaison des différentes sources électriques, il est nécessaire de donner d'abord une idée de la conductibilité relative des liquides et des métaux. Or, il arrive, pour les liquides comme pour les métaux, que l'intensité du courant est en raison directe de la section, et en raison inverse de la longueur.

Cette proposition fondamentale se démontre de la manière suivante :

On dispose différents systèmes de tubes analogues à celui qui est représenté (Pl. 22, Fig. 24), les deux tubes d'un même système étant toujours égaux et bien cylindriques; on les remplit d'un liquide, et l'on fait passer un courant sur la boussole de sinus (Fig. 17) et par les tubes, en établissant successivement les communications de trois manières différentes, pour avoir à la boussole trois déviations différentes.

Dans la première expérience, le courant ne passe que par l'un des tubes, et traverse ainsi une colonne liquide de longueur 1 et de section 1;

Dans la deuxième expérience, le courant passe par les deux tubes à la fois, et traverse une colonne de longueur 1 et de section 2;

Dans la troisième expérience, le courant passe par l'un des

tubes, puis revient par l'autre, et traverse, par conséquent, une longueur 2 et une section 1.

En comparant les trois déviations qui en résultent, on voit qu'en effet l'intensité du courant est en raison directe de la section, et en raison inverse de la longueur.

Lorsqu'on opère avec des tubes très-larges remplis de liquides bons conducteurs, il est nécessaire de tenir compte de la résistance de la pile et de la longueur du fil qui passe sur la boussole; mais, pour les tubes étroits et longs, remplis de liquides mauvais conducteurs, le fil et la résistance de la pile peuvent être négligés. Dans tous les cas, il faut, pour les expériences comparatives du même liquide, établir les communications en touchant le liquide avec le même métal, et choisir le métal pour qu'il n'éprouve pas une action chimique qui trouble les résultats; ainsi, en touchant de l'eau salée avec de l'argent, le chlorure d'argent qui se forme trouble d'un instant à l'autre tous les résultats.

Cette loi générale de l'intensité en raison directe de la section et en raison inverse de la longueur s'applique à toutes les colonnes liquides que j'ai eu occasion d'essayer, pourvu que leur longueur égale au moins cinq ou six fois leur diamètre.

Ce principe posé, la comparaison des conductibilités devient très-facile, car il suffit de comparer un seul liquide à un métal, et de faire ensuite la comparaison de ce liquide avec tous les autres.

Le liquide que j'ai choisi est une dissolution saturée de sulfate de cuivre à la température de 15°, et j'ai procédé de la manière suivante pour comparer sa conductibilité à celle du platine.

Sur une planche de 2 mètres de longueur et d'une largeur convenable, on a planté à chaque bout une rangée de petites chevilles de bois de 2 centimètres de hauteur, de 5 millimètres de diamètre, et espacées de 1 centimètre de centre en centre; puis l'on a fait passer un fil de platine d'une cheville à sa correspondante de l'autre bout de la planche, jusqu'à ce que les 200 mètres de longueur de fil fussent ainsi étalés sans se toucher; à chaque cheville d'une rangée correspondent ainsi 4 mètres de fil, ce qui donne 50 chevilles dans chaque rangée : à chacune le fil est arrêté par une goutte de cire à cacheter.

A côté de cet appareil on a disposé horizontalement un long tube cylindrique de 1 mètre de long et de 20 millimètres de diamètre, rempli de la dissolution de sulfate de cuivre, puis l'on

a fait passer le courant d'une pile sur une boussole et par la dissolution, en observant avec soin la déviation correspondante; immédiatement après, on a fait passer le même courant par la même boussole et par une longueur convenable du fil de platine, de manière à obtenir la même déviation à la boussole, ce qui n'exige pas de longs tâtonnements parce qu'on touche le fil de platine avec une pince de cuivre bien amalgamée que l'on fait passer d'un fil à l'autre, ou que l'on promène sur le même fil jusqu'à ce que la condition soit remplie : alors, il est évident que cette longueur du fil de platine qu'il faut introduire dans le circuit est équivalente à la colonne liquide ; par conséquent, la conductibilité du platine et celle du liquide sont entre elles comme le rapport direct des longueurs multiplié par le rapport inverse des sections.

La longueur du fil de platine est de 132 mètres, et son diamètre de $\frac{144}{1000}$ de millimètre.

La longueur de la colonne liquide est de 1 mètre, et son diamètre de 20 millimètres.

D'où il est facile de conclure que la conductibilité du platine est :

2 5 4 6 6 8 0,

c'est-à-dire qu'elle est deux millions de fois et demie plus grande que celle du sulfate de cuivre.

La conductibilité du cuivre étant six fois et demie celle du platine, on voit qu'elle est seize millions de fois plus grande que celle de la dissolution ; et celle du palladium est environ trente millions de fois plus grande.

Pour comparer maintenant les autres liquides au sulfate de cuivre, j'emploie l'appareil qui est représenté dans la figure 25. Cet appareil est composé de trois tubes cylindriques de différents diamètres, terminés en bas par des bouchons de cuivre, et recevant à leur partie supérieure un long fil de cuivre qui peut s'enfoncer plus ou moins dans les tubes où se trouve la dissolution saturée de sulfate de cuivre. L'autre liquide est dans un tube horizontal pareillement cylindrique, et de dimensions convenables. L'on fait passer le courant par la boussole et par le liquide à essayer; ensuite, on le fait passer par la boussole et par celui des tubes verticaux qui convient le mieux, en enfonçant le fil de cuivre jusqu'à ce qu'on arrive à obtenir la même déviation que dans l'expérience qui a été faite avec le liquide;

alors, il suffit de comparer les longueurs et les sections des colonnes soumises à l'épreuve.

Voici quelques résultats des expériences :

Liquides.	Conductibilité.
Dissolution de sulfate de cuivre saturé.............	1,0000
Id. étendue de 1 volume d'eau.....	0,6400
Id. *id.* 2 *id.*	0,4400
Dissolution de sulfate de cuivre étendue de 4 vol. d'eau.	0,3100
Id. de zinc saturée...............	0,4170
Eau distillée..................................	0,0025
Id. avec $\frac{1}{20000}$ d'acide nitrique............	0,015

Pour le sulfate de zinc, le contact du liquide a eu lieu avec du zinc, et pour l'eau avec du platine.

290. Rapport d'intensité des courants thermo-électriques et hydro-électriques. — On avait pu supposer jusqu'à présent que les courants thermo-électriques et hydro-électriques avaient entre eux des différences essentielles, tenant à la nature même de leur origine; mais l'identité des lois auxquelles ils sont soumis peut faire présumer maintenant qu'en réalité ils ne diffèrent que par leur intensité.

Une méthode au moyen de laquelle on peut les comparer sous ce rapport n'est donc pas sans importance, et nous allons faire connaître, par un exemple, celle que nous avons employée.

Un courant thermo-électrique, produit par un élément bismuth et cuivre, donne à la boussole pyrométrique une déviation de 16°; la différence des températures des deux soudures est 100°, et la longueur *totale* du circuit est équivalente à 50 mètres d'un fil de cuivre ayant un millimètre de diamètre, et une conductibilité 6,5 par rapport au fil de platine de 200 mètres de l'expérience précédente.

Un courant hydro-électrique produit par une pile ordinaire de 12 éléments très-faible, donne à la même boussole une déviation pareille de 16°; mais, pour cela, il faut que la longueur *totale* du circuit soit de 180 mètres de fil de platine. Dans cette expérience, on varie à volonté la longueur du fil de platine, comme nous l'avons dit, afin d'avoir la même déviation; et il est bien entendu que, dans les 180 mètres, sont comprises la résistance de la pile, la longueur réduite de la boussole et celle des autres conducteurs.

Ces deux courants ayant la même intensité, les sources qui les

produisent sont entre elles comme les longueurs des circuits, ces longueurs étant exprimées par le même fil.

Or, le diamètre du cuivre étant 1^{mm}, et sa conductibilité 6,5; et le diamètre du fil de platine étant $0^{mm},144$, et sa conductibilité 1,

Il est facile de voir que 1^{m} du fil de platine est équivalent à 313^{m} du fil de cuivre, et que 180^{m} équivalent par conséquent à 56340^{m}. Ainsi, le circuit thermo-électrique étant de 50^{m}, et le circuit hydro-électrique de 56340^{m} du même fil, la source hydro-électrique vaut 1127 fois la source thermo-électrique La pile de 12 paires était, comme nous l'avons dit, extrêmement faible; j'estime qu'on aurait pu la rendre 100 fois plus forte, et qu'une pile de 12 paires, très-énergique, donne un courant dont l'intensité peut être 100 000 fois plus grande que celle d'un élément bismuth et cuivre ayant une différence de température de 100°, et par conséquent 10 millions de fois plus grande que celle du courant produit par un élément bismuth et cuivre dont les soudures n'ont que 1° de différence de température.

Il est facile de voir que cette méthode de comparaison peut être appliquée à une pile quelconque, et qu'il ne serait pas nécessaire d'employer un fil de platine plus long que celui qui nous a servi; car on pourrait aisément atténuer le courant de la plus forte pile en lui faisant traverser des colonnes liquides de dimensions et de conductibilité connues, qui seraient ensuite estimées en longueur de fil de platine.

291. Définitions de l'intensité des courants, de la quantité d'électricité qui les constitue, et de la tension des sources électriques. — On peut appeler courants de même intensité ceux qui produisent la même déviation en agissant de la même manière sur la même aiguille aimantée; quand on dit, par exemple, que toutes les parties d'un circuit ont la même intensité, on n'entend pas dire autre chose, sinon qu'en prenant des longueurs égales sur ces différentes parties, elles produisent des déviations égales sur une même aiguille, lorsqu'elles agissent sous le même angle et à la même distance, ou en général de la même manière. Or, dans nos boussoles de sinus, les intensités, définies de la sorte, étant proportionnelles aux sinus de la déviation, il est évident qu'un courant aura une intensité double ou triple de l'intensité d'un autre courant lorsqu'il produira des déviations dont les sinus seront doubles ou triples.

Quantité d'électricité. — Il importe maintenant d'examiner les relations qui peuvent exister entre les intensités des courants et les quantités d'électricité en mouvement qui les constituent. Lorsque l'intensité d'un courant augmente, la quantité d'électricité qui est en circulation pour le constituer augmente-t-elle dans le même rapport? Pour résoudre cette question, l'on peut admettre comme évident que la quantité d'électricité qui passe dans un circuit d'une intensité constante est proportionnelle au temps, c'est-à-dire que dans 2″ il en passe une fois autant que dans 1″, etc., etc. Il suffit donc d'examiner si, en réduisant à moitié le temps pendant lequel passe un courant, on réduit pareillement à moitié son action sur l'aiguille : car, s'il en est ainsi, il sera vrai de dire que la quantité d'électricité est proportionnelle à l'effet électro-magnétique du courant ou à son intensité.

Parmi les moyens qui se présentent pour réduire le temps de l'action d'un courant sur l'aiguille, sans cesser d'obtenir une déviation qui soit la même pendant l'action et pendant l'interruption, j'ai adopté le suivant :

J'ai fait construire différentes roues dentées métalliques analogues à celle qui est représentée (Pl. 22, Fig. 26); les dents sont rectangulaires, et leur intervalle est rempli avec des dents de bois : cependant, la tranche de la roue se trouve unie comme le pourtour d'un disque, et présentent ainsi des surfaces alternativement conductrices et non conductrices, les premières étant toutes égales entre elles, et les secondes pareillement égales entre elles ; mais leur rapport étant variable d'une roue à l'autre.

Dans la figure 26, la dent de métal est égale à la dent de bois. Cette roue, portée sur un axe métallique, peut recevoir un mouvement de rotation extrêmement rapide ; l'un des pôles de la pile communique avec l'axe, et l'autre à un fil plus ou moins long qui passe sur la boussole de la figure 17, et vient se terminer ensuite par une petite languette *l* dont l'extrémité presse un peu contre la tranche de la roue ; cette languette est disposée pour n'éprouver aucune vibration sensible. Pendant le repos, lorsque la languette touche une dent de métal, le courant passe en totalité, et l'on peut observer la déviation qu'il imprime à la boussole : au contraire, quand la languette touche une dent de bois, le courant ne passe plus, et l'aiguille de la boussole revient au zéro. Quand le mouvement de la roue est très-lent, l'aiguille oscille et ne s'arrête pas, mais, à mesure qu'il s'accé-

lère, les oscillations diminuent d'amplitude, et l'on arrive bientôt à une certaine vitesse pour laquelle l'aiguille reste parfaitement fixe; à partir de ce point, on peut augmenter la vistesse indéfiniment, sans que l'aiguille cesse d'être immobile et de marquer la même déviation.

Par exemple, dans une expérience, la déviation était 60° pendant le repos; la roue étant mise en mouvement, il a fallu faire environ 5 tours par *minute* pour que l'aiguille cessât d'osciller : elle marquait alors une déviation de 25° 45′; et, lorsque la vitesse a été portée à 20 tours par *seconde*, l'aiguille est restée immobile à 25° 45′; le sinus de 60° étant double du sinus de 25° 45′, il en résulte que, pendant le mouvement, l'intensité du courant a été réduite à moitié. Or, la roue portait 120 dents, 60 de bois et 60 de métal : lorsqu'elle faisait 20 tours par seconde, il passait 2400 dents en 1″; il y avait donc 1200 fois passage du courant pendant $\frac{1''}{2400}$, et 1200 fois interruption pendant le même temps. Si, pendant chaque contact, on pouvait ne laisser passer que la moitié du courant et retenir l'autre moitié pour la faire passer pendant l'intermittence, il est évident que l'on aurait un courant continu formé par une quantité d'électricité moitié moindre et marquant une déviation de 25° 45′. D'où il résulte enfin que la quantité d'électricité qui constitue le courant est proportionnelle à l'intensité de ce courant; ainsi *les intensités* peuvent être prises pour *la mesure des quantités d'électricité*.

Ces expériences ont été faites avec des roues dans lesquelles les dents de bois et les dents de métal avaient d'autres rapports, et elles ont conduit au même résultat : il faut seulement avoir bien attention que les fils qui composent le circuit ne fassent pas de circonvolutions sur eux-mêmes, car, en vertu de la réaction qui constitue les phénomènes d'induction, on observe alors des résultats tout à fait différents; c'est même un très-utile moyen d'étudier ces phénomènes singuliers de réaction et d'examiner les renversements de courants qu'ils produisent quelquefois.

La proposition précédente nous conduit à cette conséquence, qu'une même source électrique peut, dans le même temps, donner des quantités d'électricité très-différentes, et que ces quantités sont précisément en raison inverse des longueurs des circuits que traverse le courant, les longueurs étant rapportées à une même unité ou à un même fil. En effet, puisque l'intensité

d'un courant est réduite à moitié lorsqu'on double la longueur totale du circuit, il est bien évident que la quantité d'électricité qui passe alors dans le même temps se trouve réduite à moitié, puisqu'elle est toujours proportionnelle à l'intensité du courant. Les sources électriques ne peuvent donc en aucune sorte être définies ou caractérisées, ni par la quantité d'électricité qu'elles mettent en circulation, ni par l'intensité des courants qu'elles produisent; car ces éléments sont essentiellement variables et liés, comme nous venons de le voir, par des lois très-simples à la nature du circuit dans lequel passe le courant de la source.

Tension des sources électriques. — Mais il y a un autre élément qui peut caractériser les sources électriques, c'est la *tension*, que nous allons essayer de définir d'une manière rigoureuse. Nous appelons *sources électriques de même tension* celles qui, dans le même circuit, donnent des courants de même intensité; et une source aura une tension double d'une autre quand, dans le même circuit, elle donnera un courant d'une intensité double, etc., etc.

Les principes que nous avons établis pour transformer un circuit en un autre équivalent, permettent toujours de comparer rigoureusement deux circuits quelconques; au reste, nous allons entrer dans quelques détails.

Si nous considérons, par exemple, la source thermo-électrique bismuth et cuivre, nous dirons que sa tension augmente proportionnellement à la différence de température des deux soudures, puisque, dans le même circuit, elle donne des courants dont l'intensité augmente en raison directe de cette différence.

Si nous considérons maintenant une pile hydro-électrique ordinaire d'un nombre quelconque d'éléments, dont la résistance soit par exemple de 100 mètres d'un fil de cuivre, et dont le courant ait une certaine intensité 1, lorsque l'on complète le circuit avec un fil pareil de 20 mètres de longueur; puis, si en ajoutant de l'acide on trouve que la résistance se réduit à 10 mètres, et qu'en complétant le circuit avec le même fil de 20 mètres son intensité se trouve quadruple, nous dirons que la tension de la pile n'est pas changée, bien qu'elle paraisse 4 fois plus forte : car, dans le premier cas, son circuit était de 120 mètres, et il est de 30 dans le second; donc ici, à égalité de tension, l'intensité doit être quadruple. Si, au contraire, en ajoutant l'acide la résistance reste la même, et si avec le même

fil additionnel de 20 mètres l'intensité est décuplée, nous dirons que la tension est aussi décuplée, puisque l'intensité est décuple avec le même circuit.

Ces considérations, que nous regrettons de ne pouvoir développer davantage, sont la clef d'un grand nombre de phénomènes qui paraissent inexplicables lorsqu'on ne les rapporte pas aux lois fondamentales que nous avons essayé d'établir.

292. Source électrique prise pour unité de tension. — Puisque les sources électriques peuvent être rigoureusement définies par leurs tensions, il est très-important d'avoir une unité commune à laquelle tous les observateurs puissent rapporter leurs résultats. L'unité qui m'a paru la plus convenable pour atteindre le but est la source thermo-électrique bismuth et cuivre, dont nous avons parlé (**281**), et que nous avons indiquée comme pouvant servir à la mesure du magnétisme terrestre.

Pour rapporter à cette unité la tension d'une source quelconque, il suffit de trouver les sensibilités relatives de la *boussole terrestre* (Pl. 22, Fig. 7), et d'une autre boussole propre à mesurer l'intensité du courant produit par la source dont on veut avoir la tension. S'il s'agit, par exemple, de la grande boussole de la figure 17, qui peut servir à tous les courants hydro-électriques un peu énergiques, on procède de la manière suivante :

On fait passer sur le cadre de la grande boussole 100 tours d'un fil très-fin; prenant ensuite un courant quelconque suffisamment affaibli, soit par une longueur convenable du fil de platine de 200 mètres, soit par des colonnes liquides, on oblige ce courant à passer à la fois sur la grande boussole et sur la boussole terrestre, munie de son fil de 20 mètres, et l'on observe les déviations qui en résultent.

Soient d la déviation de la boussole terrestre, et d' celle de la grande boussole, la sensibilité s de celle-ci avec ses 100 tours sera :

$$s = \frac{\sin d'}{\sin d},$$

en prenant pour unité la sensibilité de la boussole terrestre avec ses 20 tours.

Or, pour 1 tour de la grande boussole, sa sensibilité sera :

$$\frac{s}{100},$$

et, pour un nombre n de tours, elle sera :

$$\frac{ns}{100}.$$

La valeur de s étant une fois connue, lorsqu'on voudra comparer la tension d'une source à celle qui est prise pour unité, il faudra : 1° déterminer la longueur totale m du circuit qui compose le courant de cette source, en l'évaluant au moyen du fil de cuivre de la boussole terrestre ; 2° observer la déviation a que le courant produit sur la grande boussole avec un nombre n de tours, en choisissant ce nombre de tours, de telle sorte que la déviation soit au moins de 4 ou 5°, et au plus de 65 ou 70.

Alors le calcul sera simple, car, avec une sensibilité connue $\frac{ns}{100}$, l'intensité du courant étant sin a, elle serait

$$\frac{ns}{100}.\sin a$$

sur la boussole terrestre, dont la sensibilité est 1.

Le courant de la source prise pour unité produisant sur le même appareil une déviation d, l'intensité du premier courant est à celle du second comme $\frac{ns}{100}.\sin a$ est à $\sin d$.

Connaissant le rapport des intensités, il suffit de le multiplier par le rapport des longueurs pour avoir le rapport des tensions ou la tension t de la source, qui est, par conséquent,

$$t = \frac{m}{20}.\frac{ns}{100}.\frac{\sin a}{\sin d}.$$

293. Quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau. — L'appareil qui a servi à la décomposition de l'eau est représenté (Pl. 22, Fig. 27, 28). Il est disposé pour que les fils de platine qui sont soudés au tube de verre restent bien à égale distance pendant toute la durée d'une expérience. La cloche destinée à recevoir l'hydrogène est longue, étroite et graduée, afin que le volume de ce gaz puisse être mesuré avec exactitude. A côté de cet appareil est un compteur avec lequel on note exactement la durée de l'expérience, depuis l'instant où l'on établit la communication jusqu'à l'instant où l'on obtient le volume d'hydrogène auquel on veut s'arrêter. Ce volume a été de 2 centimètres cubes pour les décompositions lentes, et de 6, 8 ou 10 centimètres cubes pour les décompositions rapides;

mais toutes ces expériences ont été ramenées à 2 centimètres cubes.

On procède de la manière suivante :

Par des expériences préalables on détermine la résistance de la pile, celle du liquide soumis à la décomposition, et celle des autres conducteurs. Cette résistance totale est exprimée en longueur du fil de cuivre de la grande boussole des sinus (Fig. 17), qui est un appareil extrêmement commode pour ces recherches. Cette résistance une fois connue, on trouve également la longueur totale du circuit; cela fait, on rompt les communications pour remplir les cloches de liquide, on remet en place les fils de platine, et l'on compte le temps au moment où les communications sont rétablies; on observe pareillement la déviation de la boussole, qui reste constante, et on laisse marcher l'expérience jusqu'à ce que l'on ait obtenu le volume convenable d'hydrogène.

Le tableau suivant contient une série d'expériences de cette nature :

NUMÉROS de l'expérience.	NATURE du LIQUIDE.	MÉTAL qui FORME LES PÔLES.		NOMBRE de secondes pour obtenir deux centimètres cubes d'hydrogène.	DÉVIATION de l'aiguille de la boussole.	SINUS de la déviation ou intensité.	PRODUIT de l'intensité par le temps.
		PÔLE positif.	PÔLE négatif.				
1	Eau distillée avec acide sulfurique...	Platine.	Platine.	498"	5° 50'	0,1016	50,60
2		Id.	Id.	510	5 40	0,0987	50,54
3	Liquide précédent étendu d'un volume d'eau distillée.....	Id.	Id.	725	4 »	0,0697	50,53
4		Id.	Id.	728	4 »	0,0697	50,74
5		Id.	Id.	919	3 10	0,0552	50,73
6	Eau ordinaire avec acide sulfurique...	Id.	Id.	417	6 50	0,1190	49,62
7		Id.	Id.	423	6 45	0,1175	49,70
8		Cuivre.	Id.	251	11 20	0,1965	49,32
9		Id.	Id.	247	11 30	0,1994	49,25
10		Id.	Id.	247	11 30	0,1994	49,25
11		Zinc.	Id.	239	12 »	0,2080	49,71
12		Id.	Id.	258	11 »	0,1908	49,22
13		Platine.	Id.	684	4 10	0,0724	49,50
14	Acide sulfurique étendu..........	Id.	Id.	77	40 »	0,6428	49,50

La troisième colonne de ce tableau indique la nature du métal qui forme le pôle positif, auquel doit se rendre l'oxygène provenant de la décomposition ; cette indication est importante, parce qu'il arrive que, *toutes les conditions restant les mêmes*, si l'on substitue au platine du pôle positif une lame de cuivre ou de zinc, le courant prend à l'instant une intensité beaucoup plus grande ; pour le zinc, cette intensité devient triple, quelle que soit, du reste, l'intensité primitive. Ce phénomène remarquable ne résulte pas de l'électricité produite par l'action chimique que le zinc éprouve, il dépend d'autres causes dont l'étude jettera sans doute un nouveau jour sur les lois de la communication de l'électricité.

Cependant, la septième colonne de ce tableau fait voir que, malgré cette action singulière, le produit du temps, par l'intensité du courant, donne un nombre constant; ou, en d'autres termes, que la quantité d'hydrogène mise en liberté est toujours proportionnelle à l'intensité du courant, soit que cette intensité résulte de la force de la pile, ou de la conductibilité du liquide soumis à l'expérience, ou de quelque autre circonstance quelconque.

Or, comme nous avons vu précédemment que l'intensité du courant est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe, il en résulte que la quantité d'hydrogène dégagée est elle-même proportionnelle à la quantité d'électricité qui concourt à sa décomposition, ou enfin qu'il faut toujours la même quantité d'électricité pour décomposer un gramme d'eau.

Reste à trouver maintenant quelle est cette quantité d'électricité ; ce qui devient très-facile, d'après les principes que nous avons établis.

En effet, en choisissant, par exemple, les deux premières observations du tableau, l'expérience a fait voir que la longueur totale du circuit était équivalente à 5679 mètres du fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, savoir : 5531 mètres pour la résistance du liquide soumis à la décomposition, et 148 mètres pour celle de la pile elle-même et du fil de la boussole.

On a observé d'ailleurs que l'intensité de ce courant était 2,665 par rapport au courant de 20 mètres de la source thermo-électrique.

Ainsi, la quantité d'électricité qui passe par l'eau acidulée pour en opérer la décomposition et pour donner 2$^{c.c}$ d'hydro-

gène en 500", est 2665 fois la quantité qui passe dans le même temps par l'élément bismuth et cuivre pris pour unité.

On voit pareillement que la tension de la pile qui produit la décomposition est :

$$2{,}665 + \frac{5679}{20} = 756{,}72.$$

Un gramme d'eau contenant 1241$^{c.c}$,61 d'hydrogène, on voit que, pour opérer la décomposition d'un gramme d'eau, il faut une quantité d'électricité exprimée par :

1654,445,

c'est-à-dire plus de 1600 fois celle qui passe pendant 500 secondes dans la source prise pour unité; et, si l'on prend la minute pour unité de temps, on voit enfin que la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau est

13787.

Ainsi, soit qu'un gramme d'eau appartienne à un liquide bon ou mauvais conducteur, soit qu'il se trouve décomposé par une pile très-forte ou très-faible, il faudra toujours, pour en séparer les éléments, une quantité d'électricité égale à 13787 fois la quantité d'électricité qui passe en 1 minute dans un circuit bismuth et cuivre dont la longueur totale est équivalente à 20 mètres d'un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, et dont les deux soudures ont une différence de température de 100°.

CHAPITRE VII.

Électro-chimie.

J'ai essayé de réunir dans ce chapitre l'ensemble des actions chimiques qui m'ont paru appartenir essentiellement à la physique par leur intime liaison avec les phénomènes électriques de la pile. Parmi ces phénomènes, il s'en trouve qui peuvent être rapportés à des principes généraux incontestables et désormais bien acquis à la science, mais il s'en trouve aussi, et c'est le plus grand nombre, pour lesquels on est forcé de recourir à des explications dont la rigueur laisse encore beaucoup à désirer. Le cadre de cet ouvrage ne m'a pas permis d'entrer toujours dans le détail des discussions, j'ai dû souvent me borner aux faits eux-mêmes, en m'appliquant, autant qu'il m'a été possible, à les rendre d'une manière claire et précise. S'il m'est arrivé quelquefois de ne pas regarder comme suffisantes des explications qui ont été proposées et qui semblent généralement admises, ou même de passer sous silence des faits qui ne m'ont pas paru établis sur des données assez certaines, j'ai la confiance que les doutes qui se sont élevés dans mon esprit, sur ces points délicats, ne seront pas mal interprétés par les habiles physiciens qui sont plus directement intéressés dans la question, et pour les travaux desquels je professe une grande estime.

Ce chapitre est divisé en cinq parties :

§ 1. Décompositions chimiques produites par les courants.

§ 2. Actions lentes produites par l'électricité.

§ 3. Description des piles voltaïques de divers systèmes.

§ 4. Affinités chimiques modifiées par la lumière et l'électricité.

§ 5. Diverses applications de l'électricité voltaïque.

§ 1. *Décompositions chimiques produites par les courants électriques.*

294. Nous avons déjà indiqué (**239**) l'appareil qui sert ordinairement pour la décomposition de l'eau (Pl. 23, Fig. 10);

ses deux fils de platine étant mis en communication, l'un avec le pôle positif, et l'autre avec le pôle négatif de la pile, l'eau est décomposée; la cloche du pôle positif se remplit d'oxygène, et celle du pôle négatif d'hydrogène. Cet appareil se nomme *voltamètre;* il peut recevoir des dispositions différentes : celle qui est représentée (Pl. 22, Fig. 27, 28), et qui est décrite (**295**), est assez commode. Cependant, dans mes dernières recherches, j'ai adopté de préférence la disposition qui est indiquée (Pl. **24**, Fig. 1); les appareils x, y, z, entièrement de verre, servent à mettre les cloches en place et à les retirer lorsqu'elles contiennent des liquides que l'on ne peut pas toucher avec les doigts.

M. Faraday a proposé d'appeler *électrodes* les fils du voltamètre, et en général les fils conducteurs qui sont d'une part en communication avec la pile, et de l'autre avec un milieu sur lequel le courant exerce des actions chimiques. Cette expression, heureusement choisie, a été acceptée; ainsi dans toute action chimique de la pile nous aurons à considérer les deux électrodes, l'*électrode positif* et l'*électrode négatif*, qui pourront être, l'un et l'autre, formés d'une substance conductrice quelconque. La nature des électrodes exerce, en général, une double influence : l'une sur l'intensité même du courant, comme nous l'avons déjà constaté (**295**), l'autre sur la nature des composés chimiques qui se peuvent former.

Les physiciens paraissent disposés à accepter aussi l'expression *électrolyte* qui appartient, comme la précédente, à la nomenclature de M. Faraday; *électrolyte* signifie *corps décomposable par le courant électrique;* et de même *électrolysation* signifie *décomposition;* phénomènes *électrolytiques*, phénomènes qui appartiennent à la décomposition, etc.

Décomposition de l'eau. — L'eau pure ne peut être décomposée que par de fortes batteries; comme on reconnaît d'ailleurs que la présence d'une proportion infiniment faible d'un acide, d'un alcali, ou d'un sel, rend l'eau beaucoup plus rapidement décomposable par le même appareil, on est porté à conclure que la décomposition très-lente que l'on observe dans l'eau la plus pure, dépend peut-être, ou de l'air, ou de quelques autres parcelles étrangères qu'elle tient en dissolution. Il n'y a, dans l'état actuel de la science, aucun intérêt sérieux à résoudre la

question, et à savoir si l'eau parfaitement pure est ou n'est pas absolument indécomposable par le courant électrique.

En parlant de la décomposition de l'eau, nous supposerons donc toujours qu'il s'agit d'un eau acidulée ou alcaline ; on a coutume de mettre dans les voltamètres d'épreuve, de l'eau contenant depuis $\frac{1}{100}$ jusqu'à $\frac{1}{10}$ d'acide sulfurique ordinaire ; dans ce cas, l'acide sulfurique n'est jamais décomposé, et l'on recueille un volume d'oxygène au pôle positif et deux volumes d'hydrogène au pôle négatif.

Lorsque les électrodes sont de platine, le métal n'est pas attaqué d'une manière appréciable ; quelques physiciens pensent qu'il est en partie oxydé; mais il ne paraît pas que jusqu'à présent on ait recueilli une masse pondérable de cet oxyde, pour en constater les caractères, soit par l'analyse, soit par l'étude de ses propriétés.

Quand l'électrode positif se combine aisément avec l'oxygène, sous la double influence de l'électricité et du milieu ambiant, l'oxygène entre en totalité en combinaison, aucune bulle ne se dégage de l'électrode; alors plusieurs phénomènes divers peuvent se présenter : si l'oxyde est soluble dans l'électrolyte ou dans le bain, il se dissout à mesure qu'il se forme, pour composer un sel dont il est l'acide ou la base; s'il est insoluble et conducteur, il devient lui-même électrode, et l'action continue; mais en général une partie de l'oxygène sa dégage, tandis que l'autre continue à oxyder l'électrode primitif; enfin, si l'oxyde est insoluble et mauvais conducteur, l'électrolysation cesse bientôt tout à fait, à moins que l'on n'emploie des courants très-énergiques qui le détachent à mesure qu'il se forme : dans ce cas, une partie de l'oxygène se dégage encore, et il se forme un précipité.

Aussitôt que l'oxyde est entré en combinaison pour former un sel, il arrive souvent que ce sel est insoluble : alors il se précipite; mais, s'il est soluble, il éprouve presque toujours lui-même une décomposition; alors les phénomènes électrolytiques deviennent analogues à ceux que présentent les dissolutions salines dont nous devons nous occuper un peu plus loin.

Sans entrer à cet égard dans de trop longs détails, nous devons citer quelques exemples : dans l'eau acidulée avec l'acide sulfurique, si l'on excepte l'or et le platine, et sans doute ceux qui sont chimiquement dans la même section, tous les métaux

à l'électrode positif s'oxydent, les uns avec dégagement, les autres sans dégagement d'oxygène; pour la plupart, ce dégagement diminue avec l'intensité de la pile, ou plutôt avec la rapidité de la décomposition; et il est présumable qu'en étudiant avec soin les sulfates qui se forment, on trouverait des sous-sulfates insolubles nouveaux.

Dans l'eau acidulée avec l'acide azotique ou d'autres acides oxygénés, des phénomènes analogues se présentent.

Dans l'eau acidulée avec l'acide chlorhydrique et ses analogues, les phénomènes sont complétement différents, parce qu'alors les acides eux-mêmes sont décomposés en même temps que l'eau, et en plus ou moins grande proportion, suivant que l'eau est plus ou moins acidulée.

Dans l'eau rendue alcaline par la soude ou la potasse, les phénomènes sont aussi différents; il se forme souvent plusieurs oxydes, les uns qui se combinent avec l'alcali, les autres qui se précipitent.

Dans l'eau rendue alcaline par l'ammoniaque, les phénomènes sont encore différents, parce que l'ammoniaque est elle-même décomposée, même par des courants assez faibles.

Trop peu de recherches suivies et rigoureuses ont été faites dans cette direction, pour qu'il soit possible, dans l'état actuel de la science, de poser les principes d'après lesquels ces actions s'accomplissent. Ces recherches auraient cependant une grande importance.

Quand l'électrode négatif peut se combiner avec l'hydrogène, le dégagement de ce gaz cesse pareillement ou en totalité ou en partie.

En prenant par exemple pour électrode négatif des oxydes, ils sont en général réduits.

Et, quand le bain lui-même est de telle nature qne l'hydrogène puisse se combiner avec l'un de ses éléments, cette combinaison a lieu : c'est ce qui arrive par exemple avec l'eau acidulée par l'acide azotique, même quand il n'y a qu'un cinquantième ou un centième d'acide; une partie de l'hydrogène qui résulte de la décomposition de l'eau, agit sur l'acide azotique pour le transformer en acide hypoazotique. On en a la preuve, non-seulement par la coloration de la dissolution, mais encore parce que le volume d'hydrogène n'est plus alors le double du volume d'oxygène. On pourrait supposer, il est vrai, qu'ici, comme

avec l'acide chlorhydrique, il y a tout à la fois décomposition de l'eau et de l'acide ; mais cela ne me paraît aucunement probable.

295. Loi de M. Faraday sur les équivalents électro-chimiques. — Il appartenait à M. Faraday, qui a fait de si belles découvertes en électro-magnétisme et en chimie, de poser la loi fondamentale de l'électrolysation ou des décompositions électro-chimiques. Cette loi peut être énoncée de la manière suivante :

Lorsqu'un même courant traverse successivement plusieurs électrolytes différents, les poids des éléments qu'il sépare dans tous ces électrolytes sont entre eux comme les équivalents chimiques de ces éléments.

Nous allons essayer de la faire comprendre, et d'indiquer en même temps les expériences sur lesquelles elle repose, et les questions auxquelles elle donne naissance.

1° *Eau acidulée et alcaline.* Supposons d'abord que l'on ait mis à la suite l'un de l'autre autant de voltamètres que l'on voudra, les uns contenant de l'eau très-faiblement acide ou alcaline, et les autres, au contraire, de l'eau fortement acide ou fortement alcaline ; de telle sorte qu'en soumettant ces voltamètres chacun séparément à l'action de la même batterie, on obtienne des quantités de gaz très-différentes. Dès qu'ils seront soumis simultanément à l'action du même courant, les quantités de gaz seront partout parfaitement égales. Si l'une des cloches contient, par exemple, 10 centimètres cubes d'oxygène, toutes les autres cloches d'oxygène en contiendront aussi 10 centimètres cubes, et toutes les cloches des électrodes négatifs contiendront 20 centimètres cubes d'hydrogène.

Le même résultat s'observe encore si, conformément à ce que nous avons dit plus haut, l'un des gaz est en totalité ou en partie absorbé par son électrode ; c'est-à-dire que le gaz de l'autre électrode qui n'a subi aucune absorption, se trouve avoir exactement le même volume que dans les autres voltamètres.

Par conséquent, si les deux gaz de l'un des voltamètres étaient absorbés, ou plutôt entraient en combinaison sur leurs électrodes respectifs, on ne peut pas douter que les volumes combinés ne fussent respectivement égaux aux volumes recueillis dans les voltamètres où le dégagement a été total.

Ce premier exemple nous apprend que si, sur tous les points des conducteurs différents qu'il traverse, un courant électrique

est toujours identique à lui-même quant aux effets physiques qu'il peut produire, comme nous l'avons démontré (**273**), ce courant est pareillement identique à lui-même, quant aux actions chimiques qu'il exerce, du moins lorsque les actions se font sentir sur des électrolytes qui doivent donner les mêmes éléments, bien qu'ils les donnent avec des facilités très-différentes, les uns étant fort décomposables et les autres fort peu.

C'est ici le lieu de rappeler les expériences que nous avons rapportées (**293**), et la conclusion que nous en avons tirée. L'exemple des voltamètres successifs prouve bien que le même courant ne peut pas décomposer des quantités d'eau différentes; mais il ne prouve pas que la quantité d'eau décomposée est proportionnelle à l'intensité du courant, et il n'indique rien sur la quantité absolue d'électricité qui est nécessaire pour produire un effet chimique donné. Nos expériences ont eu pour objet d'établir ces deux points essentiels.

2° *Dissolutions salines.* Supposons maintenant que nos voltamètres successifs contiennent des dissolutions salines, telles, par exemple, que sulfate de cuivre, azotate d'argent, acétate de plomb, etc.; conservons toutefois un premier voltamètre, un *voltamètre-type*, contenant de l'eau acidulée avec $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{20}$ d'acide sulfurique.

Dans celui-ci l'eau est décomposée; dans les autres on recueille, en général, de l'oxygène à l'électrode positif, et du métal révivifié à l'électrode négatif (nous supposons pour plus de simplicité que tous les électrodes sont de platine). Or, quand l'opération est terminée, on observe d'abord que tous les électrolytes ont donné le même volume d'oxygène; on le mesure avec exactitude, et, de son volume, après les corrections convenables, on déduit son poids. Ensuite, on enlève les électrodes négatifs, on détache les lames de platine sur lesquelles le dépôt métallique s'est fait; elles sont lavées, séchées et pesées avec soin; puis on enlève le dépôt soit mécaniquement, soit par des actions chimiques, et l'on pèse de nouveau pour avoir enfin le poids du métal déposé. On trouve ainsi que le poids de l'oxygène est au poids des différents métaux, comme 100, équivalent de l'oxygène, est aux équivalents respectifs de ces métaux.

Il est bien entendu que je parle exclusivement ici du cas où l'action électrolytique, qui s'exerce sur la dissolution saline, ne donne que du métal révivifié à l'électrode négatif, sans aucun

dégagement d'hydrogène et sans aucune formation d'oxyde; or, il arrive que le manganèse, le fer, le cobalt et le nickel décomposent l'eau plus ou moins rapidement, à mesure qu'ils se déposent au pôle négatif; le zinc lui-même la décompose sensiblement. Ces observations conduisent à supposer que, dans la décomposition des sels de soude, de potasse, de chaux, de baryte, etc., c'est bien le métal lui-même qui est primitivement déposé sur le fil négatif, et que c'est seulement par une action secondaire qu'il décompose l'eau pour donner naissance à l'hydrogène. Pour le confirmer, il suffit, en effet, de décomposer ces sels en prenant le mercure pour électrode négatif (Pl. 24, Fig. 8); alors, on voit les amalgames se former à la surface du mercure, et longtemps après que la pile a cessé d'agir, cette surface dégage encore des bulles d'hydrogène, ce qui atteste bien la présence du métal combiné au mercure.

Que s'il arrive qu'un même métal, à deux degrés d'oxydation différents, puisse former deux sels, qui jouissent l'un et l'autre de la propriété d'être solubles, et de donner aussi, par l'action du courant, du métal révivifié à l'électrode négatif, mais seulement du métal sans oxyde et sans hydrogène, il est bien évident qu'il faudra alors, ou que les poids métalliques des deux dépôts soient différents, ou que les quantités d'oxygène soient elles-mêmes différentes; mais cette circonstance n'infirme pas la loi générale dont il s'agit.

3° *Métalloïdes oxygénés et métaux oxygénés*. Lorsqu'au lieu de soumettre à l'action du courant des dissolutions étendues dans lesquelles les éléments de l'eau sont seuls dégagés, on prend des acides concentrés, afin de les décomposer eux-mêmes, il se produit des phénomènes très-complexes qui jusqu'à ce jour n'ont pas été analysés. Les acides se décomposent, en effet; mais l'eau qu'ils contiennent encore se décompose aussi, et au lieu d'avoir une séparation nette de l'oxygène et du radical de l'acide, on a des produits secondaires variés, au milieu desquels il est difficile de démêler ce qui appartient à l'action primitive. Aucun des métalloïdes n'a été recueilli par cette voie pour mettre à l'épreuve la loi de M. Faraday.

On comprend cependant qu'ici il y a lieu à interprétation: si l'on prend, par exemple, la série azotique, et si l'on admet pour un instant que l'on parvienne à séparer réellement le radical de l'oxygène dans les composés à un, deux, trois, quatre

et cinq équivalents d'oxygène, il est absolument impossible que dans chaque voltamètre on ait à la fois un équivalent d'azote d'un côté, et un équivalent d'oxygène de l'autre ; il faut que l'un des éléments fasse la loi et que l'autre la suive ; si c'est le corps électro-négatif ou l'oxygène qui fait la loi, il y aura partout un équivalent d'oxygène et un cinquième d'équivalent d'azote pour l'acide azotique, un quart pour l'acide hypoazotique, etc,; si c'est l'azote, on aura, au contraire, partout un équivalent d'azote, et cinq, quatre, trois, deux, etc., etc., équivalents d'oxygène. Ce que la loi de M. Faraday laisse d'indécis, c'est de savoir quel est, dans ces circonstances, celui des deux éléments qui sert de règle, et de savoir aussi s'il y a à cet égard une loi générale, c'est-à-dire, si c'est toujours l'élément électro-positif qui fait la loi, ou toujours l'électro-négatif, ou tantôt l'un et tantôt l'autre, suivant les circonstances.

Ce que nous disons ici des métalloïdes s'applique pareillement aux métaux oxygénés; et il se présente aussi des obstacles qui n'ont pas été surmontés jusqu'à présent pour séparer directement le métal de l'oxygène, de manière à constater, à l'égard de ces corps, comment la loi de l'électrolysation doit être interprétée lorsqu'ils forment des combinaisons multiples.

Il y a cependant un corps qui paraîtrait devoir se prêter, mieux que les autres, à des recherches de cette nature, c'est l'*eau oxygénée*. M. Edm. Becquerel a fait quelques essais à ce sujet; il a constaté que l hydrogène se combine en partie avec l'oxygène de l'eau oxygénée pour reproduire de l'eau; mais d'après le volume de l'oxygène de l'électrode positif, il lui a paru que le voltamètre de l'eau oxygénée donnait deux équivalents d'oxygène pour un seul équivalent du voltamètre-type.

4° *Chlorures*, *bromures*, *iodures*, etc. Supposons d'abord que le circuit électrolytique se compose du voltamètre-type et de deux autres, l'un d'acide chlorhydrique concentré, l'autre d'une dissolution concentrée de chlorure de potassium ou de sodium : on reconnaît que l'acide chlorhydrique seul est décomposé, car l'hydrogène paraît à l'électrode négatif, et il n'y a aucun dégagement de gaz à l'électrode positif; le chlore est simplement dissous, sans qu'il se forme aucune combinaison de chlore et d'oxygène. Si l'acide chlorhydrique était moins concentré et que l'action fût vive, on verrait un *mélange* de chlore et d'oxygène à l'électrode positif; le voltamètre de chlorure de sodium pré-

sente exactement les mêmes phénomènes. Or, dans les trois voltamètres, les quantités d'hydrogène sont égales; d'où il suit qu'à un équivalent d'oxygène correspond un équivalent de chlore. L'hydrogène qui se dégage à l'électrode négatif du chlorure de sodium est le produit secondaire de l'action du sodium sur l'eau.

Les chlorures multiples étant beaucoup plus faciles à électrolyser que les oxydes multiples, il était intéressant de les soumettre à l'expérience pour reconnaître si la loi d'électrolysation se rapportait au radical ou au chlore; c'est ce que M. Matteucci a fait le premier : et il a constaté que le protochlorure de cuivre Cu^2Cl et le bichlorure $CuCl$ donnent l'un et l'autre un équivalent de chlore pour un équivalent d'oxygène, car le protochlorure donne *deux équivalents* de cuivre, tandis que le bichlorure n'en donne qu'*un seul équivalent*. La seule conséquence que l'on en puisse tirer, c'est que dans ce cas le chlore ou l'élément électro-négatif fait la loi au cuivre ou à l'élément électro-positif. M. Edm. Becquerel a confirmé en ce point les résultats de M. Matteucci, et il les a étendus aux chlorures de fer, d'étain et d'antimoine.

Il paraît que les iodures et bromures donnent des résultats analogues.

5° *Cyanures*. Les cyanures sont en général décomposés comme les chlorures : le cyanogène se dégageant au pôle positif lorsqu'il n'est pas en présence d'un métal avec lequel il puisse se combiner; mais lorsqu'on soumet à l'électrolysation les cyanures alcalins, et particulièrement le cyanure de potassium, le métal de l'électrode positif forme presque toujours un cyanure double; ainsi en prenant l'argent pour électrode positif, il se produit en peu d'instants un cyanure double d'argent et de potassium, qui ne tarde pas à se décomposer lui-même en formant sur l'électrode négatif un dépôt d'argent métallique plus ou moins adhérent. C'est là le principe de l'argenture, comme nous le verrons plus loin.

M. Bain a tiré parti de cette propriété pour faire les signes télégraphiques au moyen des cyanures colorés. Supposons, par exemple, qu'une feuille de papier imprégnée d'acide chlorhydrique et de cyanure double de fer et de potassium, soit appliquée, encore humide, sur une feuille de zinc qui communique au pôle négatif d'une pile; et qu'avec une tige de fer, commu-

niquant au pôle positif, on vienne former sur le papier, ou de l'écriture ou un dessin quelconque, tous ces traits seront à l'instant peints en bleu de Prusse (Pl. 24, Fig. 14). La rapidité de ces actions chimiques, sous l'influence du courant, est telle que j'ai vu M. Bain produire ainsi, dans une minute, plus de 1200 signes qui exigeaient que le courant fût interrompu au moins 3000 fois dans cette courte durée. Cependant le courant faisait un circuit de plus de 100 lieues dans les fils télégraphiques.

6° *Conclusions.* La loi énoncée par M. Faraday, et démontrée par lui pour quelques cas particuliers, est pleinement confirmée pour un petit nombre de corps et pour les séries de combinaisons dans lesquelles ils entrent comme éléments; mais par le résumé rapide que nous venons de faire des faits principaux, et bien constatés par rapport à cette loi, on peut juger de tout ce qui reste à faire pour la généraliser et la rendre applicable à l'ensemble des combinaisons chimiques.

296. Loi d'inégalité dans la puissance chimique des pôles. — Les deux pôles de la pile n'exercent pas chimiquement des actions égales pour séparer les éléments des corps composés : ainsi, quand on obtient, par exemple, deux équivalents d'oxygène au pôle positif, et deux équivalents d'hydrogène au pôle négatif, on ne doit pas, comme on l'a fait jusqu'à présent, admettre que le pôle positif ait, pour sa part, dégagé un équivalent d'oxygène, et envoyé au pôle négatif un équivalent d'hydrogène, et que, de son côté, le pôle négatif, exerçant une puissance égale, ait dégagé, par son action propre, un équivalent d'hydrogène, et envoyé au pôle positif un équivalent d'oxygène. J'ai fait voir (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, mai 1845) combien il importe de déterminer quelle est l'action relative de chaque pôle, et, en même temps, j'ai fait connaître quelques résultats très-caractérisques. Après avoir essayé divers appareils pour ces recherches, je me suis arrêté à celui qui est représenté (Pl. 24, Fig. 2, 3). Il se compose de tubes en U, d'environ 1 décimètre de hauteur et 1 centimètre de diamètre; quand les liquides sont trop mauvais conducteurs, il est nécessaire de conserver à ces tubes le même diamètre partout (Fig. 3); alors, les expériences sont moins exactes. Au contraire, quand les liquides sont assez bons conducteurs, la partie inférieure, qui établit la jonction entre les deux branches, n'est qu'un tube

étroit d'environ 1 millimètre de diamètre (Fig. 2). Voici maintenant comment se fait l'expérience : supposons que trois tubes pareils soient disposés à la suite l'un de l'autre, comme le représente la figure 2, avec l'attention de faire plonger dans toute la longueur du tube les fils de platine qui servent d'électrodes; ces tubes sont chargés du même liquide, par exemple de chlorure d'or; on met de plus dans le circuit un voltamètre ordinaire (Fig. 1), pour recueillir, dans des cloches graduées, l'oxygène et l'hydrogène qui se dégagent. Aussitôt que les communications avec la pile sont établies, les gaz paraissent aux cloches du voltamètre, mais, dans les tubes, on voit simplement l'or se déposer sur les fils négatifs; après quelques instants, le chlore paraît sur les fils positifs, et se dégage; mais aucune trace d'hydrogène ne paraît au fil négatif, et aucune trace d'oxygène au pôle positif, ce qui est une preuve que le chlorure seul est décomposé. Quand les cloches du voltamètre accusent, par exemple, 10 centimètres cubes d'oxygène, on reconnaît que toutes les branches négatives des tubes de chlorure d'or sont moins colorées que les branches positives; et si l'on prend l'un des tubes, pour faire séparément l'essai chimique du liquide de chaque branche, on constate que celui de la branche positive contient autant de chlorure d'or qu'au commencement de l'expérience, tandis que celui de la branche négative en a perdu une quantité précisément correspondante au poids de l'or déposé sur le fil négatif. Ainsi le pôle négatif a été seul efficace pour accomplir la décomposition. En continuant l'opération sur les deux tubes restants, on reconnaît de la même manière que c'est exclusivement le fil négatif qui est efficace jusqu'à l'épuisement complet du chlorure d'or qui est contenu dans la branche négative, sans que la branche positive ait rien perdu de la proportion de chlorure qu'elle contenait d'abord; seulement, vers la fin de l'opération, il arrive quelquefois que l'hydrogène paraît au pôle négatif, ce qui annonce la décomposition de l'eau, et il me paraît que cette décomposition doit encore être attribuée à l'efficacité du pôle négatif, plutôt qu'à celle du pôle positif.

Il est donc permis de conclure que, dans la décomposition du chlorure d'or, la puissance décomposante appartient exclusivement au pôle négatif.

Cette conclusion s'applique aux chlorures de cuivre, de nickel, de cobalt, de zinc, etc.

Quant aux chlorures alcalins, les phénomènes sont différents : le pôle négatif, sans être exclusivement efficace, est encore prédominant pour le chlorure de magnésium ; mais c'est le contraire pour les chlorures de potassium, sodium, baryum, etc. Ici, c'est le pôle positif qui devient prédominant, à tel point que le chlorure décomposé par le fil négatif est à peine le quart de celui qui est décomposé par le fil positif. Pour le chlorure de calcium, la comparaison est plus difficile, à cause d'une absorption considérable de chlore qui se fait au pôle positif, sans doute pour former un bichlorure.

J'avais commencé cette série d'expériences avec les appareils qui sont représentés dans les figures 7 et 9. Le premier se compose de deux tubes droits, terminés à leur partie inférieure par un petit diaphragme mince, de terre cuite poreuse, luté à la *glu marine* sur les bords du tube ; le second n'a qu'un seul diaphragme à l'une des extrémités du tube siphon qui établit la communication entre les liquides des deux vases. Mais le *transport mécanique* de liquide qui se fait dans ces appareils empêche l'exacte comparaison de la puissance relative des pôles. En général, le tube positif perd une partie de son liquide au profit du vase intermédiaire, qui en donne à son tour au tube négatif.

Ce transport mécanique, ou cette espèce d'*endosmose*, se fait quelquefois avec tant d'énergie, que le tube positif se vide complétement ; c'est ce qui arrive, par exemple, avec une dissolution peu concentrée de potasse, même lorsque les deux tubes et le vase intermédiaire contiennent primitivement le même liquide.

297. Pôles multiples. — Tout en regrettant de ne pouvoir donner ici de plus amples développements aux recherches que j'ai faites sur les actions chimiques de la pile, je dois encore mentionner un fait que j'ai constaté, et qui n'est pas sans importance pour l'explication théorique de ces phénomènes compliqués : c'est qu'un liquide devient lui-même un électrode par rapport aux autres liquides avec lesquels il est en contact, ce qui donne naissance à des pôles multiples dans les liquides soumis à l'action du courant. Je n'en citerai qu'un exemple. Supposons que le tube 1 (Fig. 4) ait été, avec des précautions convenables, rempli de deux liquides superposés, dont la couche de séparation soit en *a* ; au-dessus de *a* est de l'eau pure, et au-dessous, comme dans toute la branche négative, est un chlorure très-dense, par exemple, du chlorure de zinc. Aussitôt que l'on fait

passer un courant d'une intensité convenable, le zinc se dépose sur le fil négatif; rien ne se dégage sur le fil positif, et, après peu d'instants, l'action devient de plus en plus vive, et l'on constate que l'eau contient une proportion plus ou moins considérable d'acide chlorhydrique. Donc le chlore résultant de la décomposition du chlorure est venu jusqu'à la surface de séparation *a*, et là il s'est combiné avec l'hydrogène résultant de la décomposition de l'eau, de telle sorte que la colonne d'eau a été pôle positif par rapport au chlorure de la colonne de chlorure, et pôle négatif par rapport à l'eau.

Cette conclusion devient encore plus frappante, lorsque les communications sont établies en sens inverse, comme on le voit dans le tube 2 (Fig. 4); car, à la surface de séparation en *a*, il se forme une couche d'oxyde de zinc très-épaisse; et si, quand elle est formée, on change l'ordre des communications, on la voit disparaître peu à peu; puis on peut la reproduire et la détruire de nouveau, plusieurs fois de suite.

Le tube 3 de la figure 4 représente la même expérience, avec du chlorure de fer. Les apparences en sont un peu différentes, parce que l'oxyde de fer se forme un peu au-dessus de la couche de séparation, et présente plusieurs particularités dignes de remarque, par les mouvements singuliers qui se manifestent.

Enfin, la figure 6 est un autre exemple des pôles multiples. Sur le diaphragme poreux se déposent quelques parcelles métalliques, qui forment à l'instant un double pôle, sur lequel les ramifications métalliques se développent avec une rapidité surprenante; j'ai vu quelquefois, surtout pour les sels de cadmium, qu'elles s'accroissent en longueur de plus de 1 centimètre par seconde, et il ne faut qu'un instant pour qu'elles se propagent jusqu'au fil positif.

298. Décomposition des alcalis. — Sur une lame de platine qui communique avec le pôle positif de la pile, on pose une plaque épaisse de potasse un peu humide, ensuite on vient la toucher au centre avec un gros fil de platine communiquant au pôle négatif; dès que le courant est établi, on voit autour de ce fil une multitude de petits globules métalliques qui disparaissent bientôt en brûlant avec éclat : c'est du potassium; il est trop combustible à l'air pour se réunir en masse un peu considérable. Lorsqu'on veut le recueillir, on creuse un peu, au centre, la plaque de potasse, on y met une large goutte de mercure

qui devient l'électrode négatif dès qu'on y plonge le fil de platine; alors le potassium réduit forme avec le mercure un amalgame, d'où on le sépare ensuite en le distillant, sous l'huile de naphte, dans un tube recourbé que l'on ferme après en avoir chassé l'air.

Sans mercure, il faut une pile énergique pour électrolyser la potasse d'une manière sensible; au moyen de la goutte de mercure, on obtient le potassium, même assez rapidement, avec des piles qui ne sont pas très-fortes.

Le sodium s'obtient de même par la soude un peu humide; le baryum par l'hydrate de baryte, mis en pâte sur le mercure; le lythium, le strontium, le magnésium et le calcium, par le même procédé.

299. Dissolutions alcooliques. — On possède déjà des expériences assez nombreuses sur les effets que de puissantes batteries peuvent produire en agissant sur de l'alcool absolu, dans lequel on a fait dissoudre des alcalis ou des sels. Cependant, les composés très-divers et très-complexes qui se forment dans ces circonstances, n'ont pas encore été étudiés avec assez de soin pour que l'on puisse se rendre compte de toutes les réactions; parmi ces composés, nous citerons seulement le carbonate de potasse et une matière résineuse qui se sont produits l'un et l'autre au pôle positif d'une dissolution de potasse dans l'alcool.

300. Passivité du fer. — On avait remarqué depuis longtemps que, sous certaines conditions, le fer devient *passif*, c'est-à-dire que, en contact avec les acides oxygénés, et particulièrement avec l'acide azotique même concentré, il conserve son éclat, n'éprouve pas la moindre action, et se comporte enfin comme ferait du platine. M. Schœnbein a rappelé l'attention des physiciens sur ces phénomènes singuliers; il les a étudiés de nouveau avec une rare sagacité et une persévérance bien digne d'éloges. Je ne puis donner ici qu'une faible partie des expériences curieuses de M. Schœnbein; et, pour le faire, j'éprouve même beaucoup d'embarras : dans un sujet aussi neuf, lorsqu'il s'agit d'actions dont les causes sont si cachées et les effets si imprévus, on court grand risque de se méprendre sur la valeur des faits, de négliger les plus essentiels et de mettre en relief ceux qui ont la moindre importance. Il faudrait du moins pouvoir énumérer toutes les conditions sous lesquelles le fer prend la passivité, et toutes les conditions sous lesquelles il peut

la perdre; mais, dans l'état actuel des choses, cette simple énumération m'entraînerait trop loin, parce qu'on n'est pas encore parvenu à saisir des caractères généraux assez tranchés et assez décisifs. Voici, toutefois, les expériences qui me semblent les plus remarquables : je les tire des deux derniers mémoires de M. Schœnbein sur ce sujet. (*Archives de l'électricité*, 1842, t. II, p. 267, et 1843, t. III, p. 81.)

On se sert d'une pile simple dont chaque fil aboutit dans un godet plein de mercure; chacun de ces godets est ensuite mis en communication avec l'*électrolyte*, au moyen d'un fil ou d'une bande de métal; l'un de ces fils est ainsi l'électrode positif, l'autre l'électrode négatif. Pour l'électrolyte, M. Schœnbein emploie dans un vase de verre 11 volumes d'eau et 1 volume d'acide sulfurique : c'est ce qu'il appelle l'*auge de décomposition*. L'électrode négatif est un fil de platine, l'électrode positif un fil de fer ordinaire; si c'est celui-ci qui ferme le circuit, et qui le ferme en touchant l'eau et non le mercure, le fer est passif, il ne s'oxyde pas, et, bien plus, il n'y a pas d'hydrogène à l'électrode négatif.

Le fer redevient actif, et seulement pour quelques secondes, 1° quand on l'a touché un moment dans le liquide avec l'électrode négatif; 2° quand on a interrompu le courant dans quelques-uns de ses points pour le rétablir l'instant d'après; 3° quand on met en contact avec le fer, et dans le liquide, un morceau de métal oxydable, zinc, étain, cuivre, argent; 4° quand on a fait une puissante dérivation du courant, en plongeant dans les deux godets un fil de cuivre de quelques centimètres de longueur, que l'on enlève immédiatement après; 5° enfin quand on agite vivement la portion de fer qui plonge dans le liquide.

Si, au lieu de fermer le circuit par le contact du fer et de l'électrolyte, on le ferme d'une autre manière, le fer est actif d'abord pendant quelques instants, puis il redevient passif.

Si, pendant que le fer est passif, on fait des observations diverses en établissant la communication d'une manière permanente entre les deux godets de mercure, on observe des phénomènes divers suivant l'intensité de ce courant dérivé ; s'il a une grande intensité, il ne produit nul effet sur le fer; pour une intensité moindre, il rend le fer actif d'une manière permanente; pour une intensité moindre encore, son effet cesse de nouveau; toutefois, avant qu'il soit assez diminué pour ne plus agir, on

remarque un phénomène singulier, c'est qu'alors le fer a des périodes alternatives de passivité et d'activité qui se renouvellent un grand nombre de fois; ces périodes sont courtes et seulement de quelques secondes. Dans l'appareil de M. Schœnbein, le fer avait une activité permanente quand la dérivation entre les deux godets de mercure était faite avec un fil de cuivre d'une demi-ligne d'épaisseur, ayant une longueur de plus de 6 pouces et moins de 16 pieds.

Les effets précédents, qui se reproduisent avec les acides oxygénés, ne se montrent aucunement avec les hydracides ou les sels haloïdes.

Une autre manière de donner la passivité à un fil de fer ordinaire est de l'employer comme électrode positif d'une pile de force moyenne, et de le faire agir ainsi sur une dissolution d'acétate de plomb dans laquelle on le plonge sur la longueur de 1 centimètre et pendant 30 secondes. Un tel fil, retiré et lavé avec de l'eau, est tout à fait passif pour les expériences que nous avons rapportées plus haut, même quand une portion de la partie plongée n'a pas été recouverte de peroxyde de plomb; et les circonstances qui rendent pour quelques instants l'activité à un fil ordinaire n'agissent plus sur celui-ci. Il y a plus, il donne à des fils de fer ordinaires une passivité qu'ils n'auraient pas : ainsi, quand il va, comme électrode positif, du godet de mercure à l'auge de décomposition, le circuit n'étant pas fermé, si l'on dispose à côté de lui plusieurs fils de fer ordinaires allant comme lui du godet à l'eau, tous ces fils seront passifs lorsqu'on fermera le circuit; et d'après ce que nous avons vu, sans la présence du fil qui a une légère couche de peroxyde de plomb, ils auraient été un instant actifs.

On trouvera dans les mémoires de M. Schœnbein les explications ingénieuses qu'il propose pour rendre compte de ces faits et de leurs analogues.

301. Polarisation électrique. — Cette dénomination, qui ne me semble pas heureusement choisie, a été employée pour désigner certains phénomènes que présentent les métaux, et particulièrement le platine, soit quand ils ont servi d'*électrodes directs*, soit quand ils ont servi d'*électrodes indirects*.

Quand deux lames de platine ont été employées comme électrodes pour décomposer l'eau, seulement pendant quelques instants, et qu'on les transporte dans un autre vase contenant de

l'eau conductrice, en les mettant en communication, hors du vase, par le fil d'un galvanomètre, on observe un courant plus ou moins énergique, qui a le double caractère d'être dirigé en sens contraire du premier, et de persister pendant un temps assez considérable.

M. Becquerel a expliqué ce phénomène en l'attribuant aux éléments dont les lames se chargent pendant l'action électrolytique, l'une prenant l'élément acide, l'autre l'élément alcalin, si elles ont agi sur une dissolution saline; ou simplement l'une prenant l'oxygène, et l'autre l'hydrogène, si elles ont agi sur l'eau acidulée.

Si, dans une auge d'une certaine longueur, où l'on fait la décomposition de l'eau, on interpose une ou plusieurs lames de platine, de telle sorte que le courant doive les traverser, on remarque que cetre interposition d'un corps beaucoup plus conducteur que l'eau, affaiblit cependant le courant d'une manière remarquable. Ce phénomène rentre dans le précédent; ici, chaque lame doit agir comme électrode indirect, c'est-à-dire que l'une de ses faces agit comme électrode positif, et l'autre comme électrode négatif; alors, les gaz adhérents dont les faces se recouvrent diminuent la conductibilité dans une proportion plus ou moins grande, suivant le nombre des lames, et aussi suivant l'intensité primitive du courant.

302. Action du courant sur plusieurs dissolutions. — J'emprunte à l'ouvrage récent de M. Becquerel (*Traité de Physique*, 1844, t. II, p. 330) les expériences relatives à ce genre d'action.

« Pour bien connaître, dit-il, l'action d'un courant qui traverse successivement plusieurs dissolutions, on opère de la manière suivante :

« On prend trois capsules de porcelaine communiquant ensemble au moyen de tubes de verre remplis d'argile humide. Plaçons dans les deux vases extrêmes de l'eau, et dans celui du milieu une solution de chlorure de sodium; en faisant communiquer les deux dernières, chacune avec l'un des pôles d'une pile de 30 couples, aussitôt le chlore se montre au pôle positif et l'alcali au pôle négatif. La décomposition a eu lieu, bien que les lames décomposantes ne soient pas en contact immédiat avec la solution saline. On aurait obtenu le même effet si la solution eût été placée dans les capsules extrêmes, et que la capsule du mi-

lieu n'eût renfermé que de l'eau. Le transport des éléments s'effectue avec une telle énergie, que souvent ils traversent des milieux dans lesquels se trouvent des corps qui ont pour eux une grande affinité sans s'y arrêter. Si dans la capsule positive on met de l'eau pure, dans celle du milieu une solution d'ammoniaque, et dans la capsule négative une solution de sulfate de potasse, la potasse reste dans cette capsule, et l'acide est transporté dans la capsule négative, bien qu'il ait traversé une solution d'ammoniaque avec laquelle cependant il a beaucoup d'affinité. Il n'en est plus ainsi lorsque l'acide ou l'alcali rencontrent sur leur passage un corps avec lequel ils peuvent former un composé insoluble, et quand la pile n'a pas assez d'énergie pour vaincre les affinités qui unissent les éléments de ce dernier. Dans ce cas, la combinaison s'effectue, et le corps primitivement transporté cesse de faire partie du circuit; et c'est précisément ce qui arrive quand la capsule du milieu renferme un sel à base de baryte, et la capsule négative une solution d'un sulfate. L'acide sulfurique, en traversant la solution barytique, décompose le sel et forme un sulfate de baryte qui se précipite. La loi que nous annonçons est générale; toutefois il ne faut pas oublier que le précipité ne se forme que lorsque la pile ne fournit pas un courant assez intense pour séparer les éléments du composé insoluble. Quelques exemples feront connaître les conditions nécessaires pour que les décompositions s'effectuent. Prenons deux tubes de verre fermés avec de l'argile très-pure à leur extrémité inférieure, afin que la solution mise dans chacun d'eux ne puisse s'échapper, et plongeons-les à moitié dans un vase rempli d'eau; le premier tube, plein d'une dissolution de nitrate de cuivre, communique avec le pôle positif d'une part; le second, rempli d'eau acidulée, est en communication semblable avec le pôle négatif, l'eau seule est décomposée; le nitrate de cuivre ne l'est pas; parce que l'oxyde de cuivre ne trouve pas sur son passage, pour se rendre sur la lame négative, des éléments avec lesquels il puisse former des composés solubles. Avec une pile plus énergique que celle qui servit alors qu'on fit cette expérience, le nitrate de cuivre aurait été décomposé. En substituant un nitrate alcalin au nitrate de cuivre, la décomposition s'exécute très-facilement. Si l'on verse dans le tube négatif une solution de sulfate de cuivre, et dans le tube positif une solution de nitrate de potasse, l'eau est décomposée et l'acide nitrique est mis à nu. En se rendant

dans le tube négatif, la potasse réagit sur le sulfate de cuivre, chasse une partie de l'oxyde de cuivre qui est réduit par l'action combinée du courant et de l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau, et forme un double sulfate de cuivre et de potasse qui, en raison de son peu de solubilité, cristallise bientôt sur les parois du tube. Tant qu'il reste du sulfate de cuivre à décomposer, et qu'il y a une quantité suffisante de nitrate de potasse dans le tube positif, l'acide sulfurique n'est pas transporté dans celui-ci. Nous avons parlé de ces phénomènes dans la théorie des décompositions.

« Si dans le tube positif on met une solution de nitrate de potasse dont l'argile intermédiaire soit humectée, et dans le tube négatif un mélange à parties égales d'une solution de nitrate et une autre de sulfate de cuivre, ces deux sels seront décomposés, mais successivement et à des époques assez éloignées. Il y a réduction de cuivre sur la lame négative; il passe de la potasse dans le tube négatif; elle s'y combine avec une portion de l'acide sulfurique. L'acide nitrique devient libre dans le tube positif, et aucun réactif ne peut y faire reconnaître la présence de l'acide sulfurique libre; ce qui démontre que le nitrate de potasse d'une part, celui de cuivre de l'autre, ont été décomposés avec transport de leurs éléments à leurs pôles respectifs, tandis que le sulfate de cuivre, par les actions combinées du courant et de la potasse, a été également décomposé, mais sans transport de l'acide au pôle positif, parce qu'il s'est formé un double sulfate, comme précédemment.

« Nous n'avons plus qu'à indiquer une autre circonstance importante quand on opère avec des courants de faible intensité. Supposons de l'eau dans le tube positif, et dans le tube négatif un sulfate alcalin et l'argile humectée d'une solution de nitrate de potasse, le sulfate est décomposé; en traversant l'argile, l'acide sulfurique réagit sur le nitrate de potasse, chasse l'acide nitrique dans le tube positif, tandis que l'acide sulfurique se combine avec la potasse. Ces effets n'ont lieu que lorsque le courant a une force peu intense. Ces observations doivent être prises en considération par toutes les personnes qui veulent s'occuper sérieusement de l'étude de l'électro-chimie. »

Il est vrai que ces expériences sont admises comme parfaitement exactes; mais je suis porté à croire que l'on n'a pas assez fait attention au principe qu'elles établissent; savoir, que les

éléments séparés par l'action électrique peuvent recevoir un mouvement de translation à de grandes distances; principe qui, à mon avis, ne s'accorde aucunement avec l'ensemble des faits bien constatés. Mes expériences établissent au contraire que jamais un tel transport n'a lieu, mais que, soit par l'inégale puissance des pôles, soit par la formation des pôles multiples, il se produit dans les liquides intermédiaires des corps composés qui constituent une sorte de chaîne continue dont les anneaux sont incessamment défaits et refaits, et c'est par ces décompositions et recompositions successives que les éléments sont transportés, comme dans les décompositions ordinaires. Ainsi, loin de s'étonner qu'un alcali traverse un acide, ou réciproquement, il faudrait s'étonner au contraire qu'un acide traversât un corps pour lequel il n'aurait pas d'affinité, puisque, d'après la théorie que j'indique ici, et que je développerai dans un autre travail, c'est précisément et exclusivement par la combinaison que le transport peut avoir lieu, et non pas, comme on l'a admis jusqu'à présent, par une espèce de mouvement mécanique de translation.

Un appareil très-commode pour ce genre d'expériences est représenté (Pl. 24, Fig. 5); il se compose d'équerres de bois, dont les côtés égaux ont environ 10 ou 12 centimètres de longueur sur 4 centimètres carrés de section. Ces équerres assemblées, comme l'indique la figure, forment un vase horizontal et prismatique, mais lorsqu'on interpose entre elles des membranes de baudruches bien tendues, on y forme autant de compartiments qu'il y a de joints; les liquides qui remplissent ces compartiments ne peuvent pas se mêler, parce que les baudruches sont des diaphragmes peu perméables aux liquides et très-perméables au courant. Alors, en mettant divers liquides dans les diverses cases et les électrodes dans les cases extrêmes, il est facile de démontrer que c'est par des pôles multiples (297), par des décompositions et recompositions successives et de proche en proche que les éléments cheminent d'une manière déterminée au travers de tous ces compartiments différents.

303. Décomposition par l'électricité des machines. — On doit à Wollaston cette expérience intéressante. Dans un tube de verre, semblable à un tube de thermomètre, et fermé par un bout, on introduit un fil fin, d'or ou de platine, de manière que son extrémité pénètre dans le verre ramolli de l'extrémité

fermée ; lorsqu'on l'a ainsi enfoncé, presque au point de le faire sortir, on use le verre avec précaution, jusqu'au moment où l'on découvre à la loupe l'extrême pointe du fil de métal, ainsi mise à nu. Alors on plonge dans l'eau deux tubes semblables, en opposant l'une à l'autre les deux fines pointes métalliques ; le fil du premier est mis en communication avec une machine électrique, le fil du second en communication avec le sol. Aussitôt que la machine est mise en mouvement, des bulles de gaz se forment sur les pointes et se dégagent ; il paraît que dans quelques circonstances les gaz sont séparés, l'oxygène à la pointe positive, et l'hydrogène à la pointe négative, mais que le plus souvent les deux gaz sont unis et se dégagent ensemble de la même pointe.

§ 2. *Actions lentes produites par l'électricité.*

304. Arbre de Saturne. — Tout le monde a pu voir cette expérience ancienne et remarquable, connue sous le nom d'arbre de Saturne ; elle se fait de la manière suivante : on remplit un grand flacon d'une dissolution bien limpide d'acétate de plomb ; après avoir préparé un gros bouchon de liége qui puisse en fermer exactement la tubulure, on plante dans ce bouchon quatre ou cinq gros fils de laiton qui se rapprochent en faisceau pour les faire entrer par le goulot, et qui, une fois entrés, s'écartent par leur élasticité pour former dans le liquide une sorte de cône divergent qui descend jusque vers le fond. A l'origine de ces fils, et contre le liége, on attache avec des fils flexibles de laiton un morceau de zinc, qui communique ainsi avec toutes les branches du cône, et qui, de plus, doit être plongé dans la liqueur. Cet appareil mis en place, on lute soigneusement le bouchon pour empêcher l'introduction de l'air dans le flacon et l'évaporation du liquide ; alors au bout de quelques jours on commence à apercevoir des paillettes brillantes de plomb cristallisé qui s'attachent aux fils de laiton, d'abord vers le haut ; puis l'opération se continue pendant des mois entiers ; les lames cristallines, toujours très-vives et très-éclatantes, s'étendent de plus en plus, elles acquièrent plusieurs centimètres de surface, et se croisent de mille manières et dans toutes les directions.

Il y a là un vrai couple voltaïque ; le zinc s'oxyde et communique au laiton l'électricité négative que l'oxydation lui donne, comme dans le couple de Smée que nous décrivons plus loin ;

l'hydrogène vient donc perdre sur ce pôle l'électricité positive qu'il a au moment où il se sépare de l'oxygène, et à l'état naissant, il désoxyde le plomb qui se dépose lentement en se cristallisant; l'acide acétique est alors devenu libre pour former un équivalent d'acétate de zinc, en remplacement de l'équivalent d'acétate de plomb décomposé.

305. Conservation du doublage des vaisseaux. — On remarque que dans certaines circonstances le cuivre qui sert de doublage aux vaisseaux se corrode et se détruit avec une incroyable rapidité. Davy, supposant que cette action chimique beaucoup plus rapide, que le cuivre éprouve quelquefois dans l'eau de mer, provenait d'une action électrique particulière, fut conduit à chercher des actions électriques contraires pour en neutraliser les effets. Après avoir exposé des feuilles de cuivre dans des vases remplis d'eau de mer, et fait communiquer ces vases entre eux, soit par des fils de cuivre, soit par des siphons eux-mêmes remplis d'eau, il essaya de mettre en contact avec le cuivre du premier vase des métaux oxydables, comme le zinc, le fer, la fonte, etc., pour examiner si ces métaux protégeraient le cuivre, et jusqu'où cette protection pourrait s'étendre. L'expérience réussit; conformément à ses prévisions, le métal oxydable se détruisait, mais le cuivre était préservé, et il l'était jusqu'à une très-grande distance du point de contact du métal préservateur.

Cependant les expériences pratiques, tentées sur plusieurs grands vaisseaux anglais, sans contrarier la théorie, n'eurent pas tout le succès que l'on en avait espéré. En général, le doublage était trop bien préservé, c'est-à-dire qu'il devenait pôle trop positif dans le couple qu'il formait avec le zinc ou la fonte. Alors les oxydes de chaux, de magnésie, etc., ne tardaient pas à ternir l'éclat métallique du cuivre, à se déposer sur lui, en couches assez épaisses pour fixer les herbes, les coquillages, etc.; si bien que le bâtiment était préservé, il est vrai, mais il l'était aux dépens de sa qualité la plus essentielle, car il devenait lourd et mauvais marcheur.

306. Corps simples, oxydes, etc., obtenus par M. Becquerel. — M. Becquerel a étudié le premier avec suite les actions lentes de l'électricité, et il les a appliquées avec un rare succès, soit à isoler des corps simples, qui n'avaient jamais pu être obtenus électriquement, soit à former des oxydes cristallisés, ou d'autres

corps plus complexes, analogues à ceux qui se présentent dans la nature. Nous allons essayer, par quelques exemples, de donner succinctement une idée de sa méthode et de ses principaux résultats.

Silicium. — On remplit un petit flacon d'une dissolution d'eau salée; dans le bouchon qui doit le fermer, on fait passer deux tubes de 3 ou 4 millimètres de diamètre; leur extrémité inférieure est coiffée d'un linge, sur lequel on dépose environ 1 centimètre de hauteur d'une argile humectée aussi avec de l'eau salée. Dans l'un de ces tubes on verse une dissolution saturée de silice en gelée dans l'acide chlorhydrique du commerce, qui contient un peu de fer; dans l'autre, on verse une dissolution d'eau salée; alors le bouchon se met en place sur le flacon, de telle sorte que par leur extrémité inférieure les deux tubes plongent dans la dissolution qu'il contient. Cela fait, on plonge une lame de platine dans le tube à dissolution de silice, une lame de zinc dans le tube à dissolution de sel, et l'on met les lames en communication au moyen d'un fil métallique. Après un certain temps, la lame de platine se couvre de lamelles brillantes qui sont un siliciure de fer, et, l'action une fois commencée par l'intervention du fer, dont la présence est nécessaire, elle se continue de telle sorte, que la lame de platine se trouve à la fin couverte de silicium en écailles brillantes, qui conservent tout leur éclat tant qu'elles sont sous l'influence du courant.

M. Becquerel a obtenu de la même manière l'aluminium, le zirconium et le magnésium, et il est présumable que cette méthode s'appliquerait aux autres métaux alcalins qui n'exercent pas sur l'eau une action vive à la température ordinaire.

Oxyde de cuivre. — Dans un tube fermé par un bout, l'on introduit, au fond, du deutoxyde de cuivre, sur lequel on verse une dissolution saturée d'azotate de cuivre; ensuite on dispose dans ce mélange une lame de cuivre assez longue, dont une partie touche le deutoxyde et l'autre la dissolution : puis l'on ferme le tube à la lampe pour l'abandonner à lui-même. Après un certain temps, on voit paraître sur la lame de cuivre de petits cristaux brillants, de forme octaédrique, et de couleur rouge foncé; c'est le protoxyde de cuivre cristallisé.

Hydrate de chaux. — Dans les deux branches d'un tube en U, dont l'extrémité inférieure est remplie d'argile humide, on verse de l'eau de Seine; on plonge à droite et à gauche une lame de

platine, et l'on fait passer le courant d'une pile d'une quinzaine d'éléments; après un certain temps, la branche négative donne la réaction alcaline, et ensuite la chaux hydratée se montre en cristaux réguliers.

Chlorure de cuivre et d'argent. — L'argent, par son contact avec l'anthracite ou le charbon, détermine des réactions remarquables dans l'acide chlorhydrique : le morceau de charbon se fixe sur la lame d'argent avec un fil de même métal; on l'introduit ensuite dans un tube contenant de l'acide chlorhydrique. Ce tube ne doit pas être fermé, car il éclaterait par la pression des gaz qui se développent; il est seulement rétréci pour donner issue à ces gaz, sans permettre une trop grande évaporation. Après quelques mois, le chlorure d'argent cristallisé apparaît sur la lame d'argent, et l'on constate qu'il se dégage pendant l'opération de l'hydrogène carboné, formé par le contact de l'hydrogène naissant et du charbon.

Le chlorure de cuivre s'obtient par le même procédé.

Carbonate double de cuivre et de soude. — Dans l'une des branches d'un tube en U, on verse une dissolution de bicarbonate de soude, dans l'autre une dissolution de sulfate de cuivre; elles sont séparées au fond du tube, par de l'argile humide. Deux lames de cuivre, communiquant entre elles, plongent, l'une à droite, l'autre à gauche. Après un certain temps, on voit dans la dissolution de soude de belles aiguilles satinées, d'un vert bleuâtre; c'est le double carbonate de soude et de cuivre.

§ 3. *Description des piles voltaïques de divers systèmes, et examen des actions chimiques qu'elles éprouvent.*

Après avoir essayé d'expliquer, autant que l'état actuel de la science le permet, les actions chimiques produites par les courants électriques et les dégagements d'électricité produits par les actions chimiques, je vais essayer de donner, en peu de mots, une description des diverses piles qui ont été imaginées dans ces derniers temps, et d'indiquer les principales recherches qui restent à faire pour expliquer d'une manière satisfaisante les phénomènes électriques et chimiques qu'elles présentent.

J'examinerai successivement les piles à un seul liquide et les piles à deux liquides.

Piles à un seul liquide.

307. Pile de Smée. — L'élément de la pile de Smée est représenté (Pl. 23, Fig. 14, 15). La figure 14 est une vue de face, et la figure 15 une vue de profil; il se compose d'une large lame *p* de *platine platiné*, comprise entre deux lames *z* de *zinc amalgamé*, dont la largeur est seulement un peu plus du tiers de la largeur de la lame de platine. Celle-ci est pincée à son bord supérieur entre deux règles de bois *rr*, dont les prolongements reposent sur les bords du vase de verre ou de porcelaine dans lequel plonge l'élément, et servent ainsi à le soutenir; la partie supérieure des zincs s'appuie et se presse contre ces règles de bois, dont l'épaisseur détermine par conséquent la distance qui doit exister entre les lames de zinc et celle de platine.

On adopte en général les proportions de 7 d'eau et 1 d'acide sulfurique pour le liquide dans lequel plonge l'élément. Dans les éléments de grandes dimensions, comme celui qui est représenté sur nos figures, la lame de platine a 200 millimètres de hauteur, 130 de largeur; les zincs, 180 de hauteur et 55 de largeur; alors il est nécessaire de soutenir, par un petit cadre en bois, les trois autres bords de la lame de platine.

Une pince métallique qui presse les deux bords supérieurs des zincs contre les règles de bois, porte le *fil négatif*, et une pince pareille pressant la lame de platine porte le *fil positif*.

Quand la communication n'est pas établie entre les fils, l'acide sulfurique du liquide n'agit pas sensiblement sur le zinc amalgamé, car on ne voit pas de dégagement d'hydrogène; mais aussitôt que les fils communiquent, ou directement, ou par l'intermédiaire de divers conducteurs métalliques ou liquides, l'action est plus ou moins vive, suivant la nature et les dimensions de ces conducteurs; l'hydrogène se dégage en abondance sur la surface du platine; le zinc s'oxyde et se transforme en sulfate, qui tombe au fond du vase.

Il y a donc ici trois actions chimiques, savoir : 1° décomposition de l'eau; 2° oxydation du zinc; 3° combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique. Supposons d'abord que ces actions soient successives. L'eau étant décomposée, l'oxygène est électrisé négativement et l'hydrogène positivement. Admettons, pour un instant, que l'oxygène se remette à peu près à l'état naturel par son contact avec la lame de zinc, celle-ci sera alors électrisée

négativement, tandis que l'oxygène lui-même et la molécule de zinc qu'il oxyde, remis sensiblement à l'état naturel, se chargeront par cette combinaison, le premier d'électricité positive, et le second d'électricité négative. Mais ces électricités égales et contraires ne pourront pas entrer dans le courant, car il faudrait qu'elles pussent passer isolément dans les conducteurs métalliques, et l'on ne conçoit pas comment cela serait possible. Il en est de même des électricités égales et contraires qui résultent de l'action de l'acide sulfurique sur l'oxyde de zinc. Ainsi, les deux fluides développés par les *actions secondaires* sont contraints de se recomposer directement entre eux, et le courant ne se peut composer que des fluides contraires développés par l'*action primitive*, c'est-à-dire par la décomposition de l'eau.

Cependant il reste à voir pourquoi l'électricité positive de l'hydrogène paraît sur la lame de platine : on peut admettre qu'à l'instant où les communications sont établies, l'électricité négative dont les lames de zinc sont chargées par le fait de la première oxydation, passe immédiatement par les fils ou par les conducteurs sur la lame de platine, qui, se trouvant ainsi électrisée négativement, attire les molécules d'hydrogène qui sont chargées d'électricité positive.

Si les phénomènes se passent réellement de la sorte, la pile de Smée, éprouvée au condensateur, ne doit pas se comporter comme certaines piles à deux liquides, où il y a une double action; c'est, en effet, ce que j'ai constaté par l'expérience.

Il paraît bien certain, d'ailleurs, que l'électricité résultant de la décomposition de l'eau est la seule qui constitue le courant dans la pile de Smée; car, s'il en était autrement, la loi de Faraday ne pourrait pas être exacte. En effet, l'eau acidulée décomposée par deux électrodes de platine, ne donnerait pas la même quantité d'hydrogène que le même liquide décomposé par un électrode positif de zinc, puisque l'électricité d'oxydation tiendrait lieu d'une certaine quantité d'électricité de décomposition. Voici, au reste, une série d'expériences de MM. Boquillon et Silbermann, qui en donne une confirmation directe. MM. Boquillon et Silbermann ont disposé un grand élément Smée de manière à recevoir exactement tout l'hydrogène qui se dégage sur la lame de platine; chaque opération a été prolongée assez longtemps pour donner au moins 7 ou 8 litres d'hydrogène, et le plus souvent jusqu'à 17 ou 18 litres. En même temps le fil po-

sitif de l'élément arrivait à une plaque de cuivre plongeant dans un bain de sulfate de cuivre, tandis que le fil négatif arrivait à un moule métallique, plongé dans la même dissolution en regard de la plaque de cuivre. Les communications étant établies, l'élément Smée éprouvait les actions dont nous avons parlé, tandis que dans le bain de sulfate de cuivre le moule du pôle négatif recevait du cuivre révivifié, et le cuivre du pôle positif se corrodait et se transformait en sulfate de cuivre, pour maintenir la dissolution à l'état de saturation. Aucun gaz n'apparaissait dans le bain de sulfate de cuivre ni au pôle positif, ni au pôle négatif. A la fin de chaque opération, l'hydrogène recueilli sur le platine de l'élément était jaugé avec soin : on en déduisait le poids en faisant toutes les corrections de pression, de température et d'état hygrométrique; pareillement on pesait avec soin le moule, pour en déduire le poids correspondant du cuivre déposé; ensuite on divisait celui-ci par le premier pour avoir leur rapport. Plus de trente opérations de cette espèce ont donné, pour ce rapport, des nombres extrêmement voisins : la moyenne est 31,66; le nombre le plus fort est 32,88, et le plus faible 30,20. En multipliant le nombre 31,66 par l'équivalent de l'hydrogène 12,50, on trouve 395,76 pour l'équivalent du cuivre, pour lequel les analyses chimiques les plus exactes donnent 395,69.

Nous remarquerons d'abord que ces expériences sont d'autant plus décisives, qu'elles portent sur des masses suffisantes; lorsque, dans des expériences de cette nature, on s'attache à comparer des milligrammes, on court toujours le risque de commettre des erreurs qui sont de l'ordre des nombres que l'on compare.

Nous remarquerons ensuite qu'elles conduisent à deux conséquences importantes : 1° c'est que, dans l'appareil de Smée, l'électricité qui constitue le courant résulte exclusivement de l'eau décomposée, et contient absolument tous les fluides électriques résultant de cette décomposition; 2° que l'équivalent de cuivre engagé dans le sulfate exige pour sa révivification autant d'électricité négative que l'équivalent d'hydrogène en dégage par sa combinaison avec l'oxygène, comme nous l'avons annoncé plus haut.

Il me reste à indiquer maintenant les avantages que l'on trouve à *amalgamer le zinc* et à *platiner le platine*.

Lorsque le zinc n'est pas amalgamé, il est directement attaqué par les acides, même quand ils sont étendus d'une grande quantité d'eau ; alors l'hydrogène se dégage sur la surface même du zinc. Que devient l'électricité positive dont il est nécessairement chargé à l'instant où il se sépare de l'oxygène? C'est un point sur lequel il est permis de conserver encore quelques doutes : du moins je ne connais aucune expérience qui tranche la question d'une manière décisive. Il me paraît cependant assez probable que les phénomènes se passent conformément à ce que l'on admet en général, c'est-à-dire qu'il se forme sur la surface même du zinc divers éléments galvaniques ; quelques points moins disposés à l'oxydation deviennent des pôles où se porte l'hydrogène, et tiennent lieu par conséquent de la lame de platine de l'élément que nous décrivons ; alors la communication entre le pôle négatif, ou le point oxydé, et le pôle positif ou le point qui ne l'est pas, s'établit par l'intérieur même de la masse de zinc. Il parait impossible en effet que les molécules d'hydrogène, même à l'état naissant, cèdent au liquide mauvais conducteur où elles se trouvent, la totalité de l'électricité positive dont elles sont chargées à l'instant de leur séparation : si elles la cèdent, ce liquide doit être positif au condensateur ; si elles ne la cèdent pas, elles doivent se dégager avec de l'électricité positive sensible au condensateur ; mais si elles vont la perdre sur quelques points du zinc, le condensateur ne doit rien recevoir, ni du zinc, ni du liquide, ni des bulles d'hydrogène.

Dans tous les cas, la couche de mercure, en s'amalgamant avec le zinc, change cette disposition ; le zinc, comme nous l'avons vu, cesse d'être directement attaquable ; il le devient seulement quand le zinc et le platine communiquent par un conducteur convenable ; et cependant, au moment où cette communication est établie, le zinc devient en quelque sorte plus oxydable que s'il n'était pas amalgamé, car on peut à coup sûr obtenir dans le même temps plus de sulfate de zinc sur la même surface, que l'on n'en obtiendrait d'une plaque libre et non amalgamée. Il y a là des recherches à faire pour se rendre un compte exact de ces phénomènes, et pour reconnaître si le contact du mercure avec le zinc qu'il a dissous ne modifie pas jusqu'à un certain point les affinités chimiques.

C'est M. Kemp qui a le premier fait connaître tous les avantages que l'on pouvait tirer du zinc amalgamé, dans la composi-

tion des appareils voltaïques (*Journal de Jameson*, décembre 1826; Smée, *Electro-metallurgy*, 1841, p. 12).

Le rôle du *platine platiné* paraît plus accessible à la théorie. Il est bien constant que, suivant l'état dans lequel il se trouve, le platine a la propriété de se couvrir plus ou moins facilement d'une couche gazeuse qui empêche le contact immédiat du liquide, et par conséquent des éléments gazeux qui se rendent à sa surface faisant fonction d'électrode positif ou négatif. Soit à raison de ses aspérités, soit pour quelque autre raison, le platine platiné paraît moins propre à retenir ses couches gazeuses; c'est pourquoi il agit comme corps meilleur conducteur, et donne beaucoup plus d'énergie au courant.

Ce dépôt de platine noir sur les lames de platine, qui constitue le platine platiné, s'obtient en plongeant les lames de platine bien décapées, dans une dissolution de double chlorure de potassium et de platine, et en les mettant en communication avec le pôle négatif d'une pile qui n'ait pas trop d'intensité, le fil positif plonge dans la dissolution, et le platine se dépose. Si le pôle positif est lui-même une lame de platine, cette lame est attaquée par le chlore, et la dissolution conserve son degré de saturation.

M. Smée avait eu l'idée d'employer des lames de plaqué d'argent, pour les platiner ensuite; mais le poli de l'argent se prête mal à cette opération et ne donne pas d'assez bons résultats. M. Boquillon a imaginé, à cet égard, un perfectionnement important : il prend d'abord une lame mince de cuivre du commerce, il y dépose une couche de cuivre, en disposant l'appareil pour que ce dépôt soit rugueux et couvert de petites aspérités; par une seconde opération, il couvre cette première couche d'une couche d'argent qui participe au même état superficiel, et c'est sur cette couche d'argent qu'il dépose enfin le platine pulvérulent et adhérent qui donne à la lame et au plus haut degré la propriété de dégager librement l'hydrogène.

Il est présumable qu'avec les plaques de M. Boquillon, qui sont plus efficaces que celles de M. Smée, on pourrait augmenter un peu les proportions des lames de zinc par rapport à celle de platine platiné.

Pile ordinaire de Wollaston. — Ce que nous venons de dire de la pile de Smée nous dispense d'entrer dans de longs détails sur la pile ordinaire de Wollaston (Fig. 9, 11, 12); les actions chimiques et électriques sont pareilles, avec cette différence que le

zinc n'étant pas amalgamé, il y a une action, même quand les deux pôles ne communiquent pas entre eux ; par conséquent, il y a une dépense inutile d'acide et de métal. Il est probable aussi que l'affaiblissement rapide que la pile de Wollaston éprouve dépend de cette cause bien plus encore que de l'affaiblissement des acides. On éviterait sans doute une partie de ces inconvénients en employant du zinc amalgamé ; mais il ne paraît pas que le cuivre puisse jamais être aussi efficace que le platine platiné pour dégager l'hydrogène. Il y aurait des recherches intéressantes à faire pour analyser les causes véritables qui affaiblissent si rapidement le courant dans les piles de cette espèce.

Pile de Young. — La figure 20 représente la disposition qui a été imaginée par M. James Young, pour composer des batteries d'un très-grand nombre d'éléments, occupant très-peu de place (*Phil. mag.*, 1837, t. X, p. 241). *p* est l'ensemble de la pile en action ; *p'* montre au contraire, sur une plus grande échelle, les détails de la construction : on y voit la feuille de zinc telle qu'elle doit être découpée, avec l'appendice *a* qui se soude à un appendice pareil de la lame de cuivre, qui est aussi exactement découpée comme celle de zinc ; seulement, en les unissant, la bande *b* qui joint les deux parties d'une plaque est mise toujours d'un côté pour les zincs, et toujours de l'autre pour les cuivres. Au moyen de cette disposition, chaque zinc est entre deux cuivres, et chaque cuivre entre deux zincs. Il en résulte que, comme dans la pile de Smée, le zinc étant attaqué et chargé d électricité négative, cette électricité se communique métalliquement au cuivre auquel il est soudé ; ainsi, c'est au même instant que tous les zincs et tous les cuivres sont chargés d'électricité négative ; par conséquent, l'hydrogène, qui est, lui, chargé d'électricité positive, trouve à une petite distance une surface négative qui l'attire, et sur laquelle il vient se dégager, après y avoir déposé son électricité positive. Il importe beaucoup dans les piles de cette espèce que les éléments zincs soient attaqués avec la même énergie, précisément parce que les deux cuivres qui enveloppent un zinc ne reçoivent pas de lui l'électricité négative qui doit neutraliser l'électricité positive de l'hydrogène que ce zinc a mis en liberté.

Pile de Munch. — La figure 21 représente une disposition de pile encore plus simple que celle de Young, elle est beaucoup plus facile à construire, et réunit exactement les mêmes avan-

tages. Cinquante éléments occupent à peine 3 décimètres de longueur ; il suffit de quelques baguettes de bois pour les tenir réunis, et d'une auge de bois mastiqué pour contenir le liquide où ils doivent plonger. Rien n'est plus commode que cette pile; elle n'a que peu de poids et peu de volume ; ses effets sont énergiques et assez durables. En prenant soin d'amalgamer les zincs (et leur forme s'y prête aisément), cette disposition, imaginée par M. Munch, de Strasbourg, me semble de beaucoup la plus avantageuse lorsqu'il s'agit de réunir un grand nombre d'éléments.

Élément de Sturgeon. — La figure 19 représente un élément analogue à celui de Smée et imaginé par M. Sturgeon ; il se compose d'un vase cylindrique de fonte de 250 millimètres de hauteur et de 76 millimètres de diamètre ; on le remplit d'un liquide composé de 8 parties d'eau et 1 d'acide sulfurique; au centre, on plonge un cylindre ou une lame de zinc amalgamé, reposant sur un petit disque de bois. Les phénomènes qui se produisent ici sont identiquement les mêmes que dans l'élément de Smée. L'hydrogène se dégage en abondance sur la paroi intérieure du vase de fonte ; il paraît que l'intensité du courant est plus grande quand cette paroi a été oxydée ; on comprend, en effet, ou que l'hydrogène réduit cet oxyde quand il existe, ou qu'il se dégage plus facilement sur les molécules et sur les aspérités du fer révivifié. Une pile de 8 ou 10 éléments est capable de produire des effets énergiques.

Élément de Wheatstone. — Cet élément est représenté dans la figure 25; il se compose d'un vase poreux de terre rouge à moitié cuite, que l'on remplit d'un amalgame pâteux de zinc; ce vase repose au centre d'un vase de verre ou de porcelaine que l'on remplit de sulfate de cuivre; dans l'amalgame on plonge un fil de cuivre qui est le *pôle négatif* de la pile; autour du vase poreux et dans le bain de sulfate de cuivre est une lame de cuivre communiquant à un fil de même métal et formant le *pôle positif* de la pile. Le zinc de l'amalgame est attaqué avec le temps, même quand le fil positif et le fil négatif ne communiquent pas; mais l'action est faible : au contraire, si les fils communiquent, l'action est vive, l'eau est décomposée, le zinc s'oxyde, l'amalgame devient négatif, et cette électricité négative se transmet immédiatement à la feuille de cuivre qui plonge dans le bain de sulfate de cuivre; l'hydrogène positif, résultant

de la décomposition de l'eau, se rend donc au cuivre, et là, il réduit l'oxyde du sulfate pour donner lieu à un dépôt de cuivre métallique, tandis que l'acide devient libre pour se combiner avec l'oxyde de zinc. Ainsi, pour un équivalent de zinc oxydé, il y a un équivalent de cuivre révivifié. Le sulfate de zinc qui se forme s'élève au-dessus de l'amalgame. Cet élément a une force sensiblement constante, autant du moins que le vase poreux permet une circulation également libre des liquides, et que la dissolution de sulfate de cuivre est maintenue à un degré convenable de saturation.

Élément de Bagration (Fig. 22). — Comme pile à un seul liquide je dois mentionner encore un appareil à chlorhydrate d'ammoniaque, imaginé par M. le prince de Bagration, et particulièrement convenable, à ce qu'il paraît, pour les expériences de galvanoplastique. Cette pile, dont je n'ai pas eu occasion de me servir, se construit en mettant dans un vase de verre ou de bois des cylindres ou des lames parallèles de zinc et de cuivre, à une petite distance l'une de l'autre. Le vase est en partie rempli de terre ou de sable, et arrosé de temps à autre avec du chlorhydrate d'ammoniaque; des communications convenables sont établies entre les plaques de zinc et de cuivre.

Les piles de Smée, de Wollaston, de Young, de Munch, de Sturgeon et de Wheatstone, dont nous venons de parler, ont ce caractère commun, qu'elles sont toutes à un seul liquide; que l'électricité y est toujours produite par la décomposition de l'eau, résultant de l'affinité du zinc pour l'oxygène; que les deux métaux qui les composent s'y trouvent l'un et l'autre à l'état négatif par la communication plus ou moins conductrice qu'ils ont entre eux au dehors du liquide, et que l'hydrogène qui est positif ne vient à l'élément non oxydé, platine, cuivre ou fonte, que parce que cet élément est chargé de l'électricité négative qu'il a reçue du zinc, et peut ainsi, en décomposant l'eau en sens inverse, c'est-à-dire en prenant l'hydrogène, compléter la chaîne des décompositions successives entre toutes les molécules liquides qui séparent les deux métaux.

La tension électrique élémentaire de ces diverses piles peut cependant être variable; il en est de même de la quantité d'électricité développée sur une surface donnée, à cause des états divers dans lesquels se trouve le zinc, à cause de la conductibilité propre du liquide, et enfin à cause de l'état différent dans

lequel se trouvent les surfaces sur lesquelles l'hydrogène se dégage ou se combine pour opérer des révivifications métalliques.

Piles à deux liquides.

308. Pour types des piles à un seul liquide, nous avons choisi de préférence l'élément de Smée, parce que les phénomènes s'y accomplissent d'une manière simple et régulière. Pour les piles à deux liquides, nous choisirons par les mêmes motifs l'élément de Daniell, qui a d'ailleurs l'avantage de donner facilement des courants d'une intensité constante.

Élément de Daniell. — Cet élément est représenté sous trois formes différentes dans les figures 24, 26, 30. L'élément de la figure 24 est celui qui m'a servi à déterminer les lois de l'intensité des courants hydro-électriques (voy. nos **285** et suivants). Je vais d'abord en donner la description : il se compose d'un cylindre creux de cuivre rouge très-mince *a*, lesté avec du sable *b*, et fermé de toutes parts; le fond intérieur *c* est plat, et le fond supérieur *d* est conique; au-dessus de la base de celui-ci s'élève un rebord *e*, percé de plusieurs trous *f*; ce cylindre s'engage dans une vessie *g* qui vient se lier autour du rebord *e*, mais au-dessus des trous *f*. On verse sur le cône *d* une dissolution saturée de sulfate de cuivre, qui tombe par les trous *f* et qui vient remplir tout l'espace compris entre la vessie et le cylindre; ensuite on met sur le même cône des fragments de sulfate de cuivre que l'on renouvelle à mesure qu'ils se dissolvent dans le liquide, qui doit toujours les baigner un peu : un manchon de zinc *h*, qui est fendu sur sa longueur pour s'élargir à volonté, est plongé dans une dissolution de sulfate de zinc ou de chlorure de sodium, contenue dans un vase *i* de verre ou de faïence. On met le cylindre de cuivre dans le manchon de zinc, et les deux bandes de cuivre *p* et *n*, soudées l'une au cylindre et l'autre au manchon, représentent les deux pôles de l'élément; dès qu'on établit entre elles une communication métallique, on obtient un courant d'une intensité constante, pendant des heures, des journées entières, si cette communication reste la même.

Pendant que le courant se produit et que son intensité s'observe avec les boussoles dont nous avons parlé (**284**), le cylindre de cuivre se charge d'un dépôt de cuivre métallique révivifié, qui est en général pulvérulent et sans adhérence, et la dissolution de sulfate contenue dans la vessie s'appauvrirait rapide-

ment, si l'on n'ajoutait pas de temps à autre sur le cône *d* des fragments solides, qui disparaissent et la maintiennent à l'état de saturation. D'un autre côté, le zinc s'use, et au dehors de la vessie, dans le vase de verre, la proportion de sulfate de zinc augmente.

Les phénomènes chimiques peuvent ici, comme dans les cas analogues, être interprétés de plusieurs manières. Les réactions qui s'accomplissent n'ont pas été analysées jusqu'à présent avec une exactitude suffisante pour qu'il soit possible d'en rendre compte d'une manière rigoureuse. Cependant, il est présumable que le zinc tend à s'oxyder par la décomposition de l'eau qui le touche, et qu'il est ainsi constitué à l'état négatif; qu'au moyen des conducteurs extérieurs, il communique cet état au cylindre de cuivre, qui par là devient apte à recevoir l'hydrogène et à absorber son électricité positive. Toutefois, l'hydrogène naissant, au lieu de se dégager, réduit l'oxyde de cuivre du sulfate; le métal se dépose, et l'acide sulfurique devenu libre ne tarde pas à s'emparer de l'oxyde de zinc qui s'est formé. On voit que cette explication est incomplète en ce qu'elle ne montre pas comment l'acide sulfurique mis en liberté arrive au zinc pour dissoudre l'oxyde de zinc à mesure qu'il se forme. Quelques physiciens disent, il est vrai, qu'à l'instant où le zinc est mis en communication avec le cylindre de cuivre, il se fait une double décomposition : celle de l'eau et celle du sulfate de cuivre; qu'en conséquence, l'oxygène et l'acide sulfurique viennent ensemble au zinc, tandis que l'oxyde de cuivre et l'hydrogène s'en vont ensemble au cylindre de cuivre. Mais cette hypothèse ne me paraît pas résoudre la difficulté : elle n'explique pas pourquoi le sulfate de cuivre est décomposé, à moins que l'on n'ajoute que le courant produit par la décomposition de l'eau entraîne la décomposition du sulfate de cuivre et le transport de ses éléments; ce qui ne me semble aucunement justifié.

Malgré l'incertitude qui peut rester sur quelques-unes des actions secondaires et sur leurs causes, je suis porté à croire que dans l'élément de Daniell, comme dans les précédents, la cause unique du développement de l'électricité qui constitue le courant est la décomposition de l'eau; et que si l'on employait ici du zinc amalgamé et de l'acide sulfurique étendu, de manière à n'avoir aucun dégagement de gaz, on trouverait que pour un équivalent de zinc détruit on aurait exactement un équivalent de cuivre ré-

vivifié. Ces résultats ne me paraîtraient pas, du reste, devoir être changés, en substituant à l'acide sulfurique étendu une dissolution de sulfate de zinc ou de chlorure de sodium, ou des mélanges de dissolution analogues, qui agissent sur le courant par leur conductibilité propre et aucunement par les actions secondaires diverses auxquelles elles donnent naissance.

La *pile de Daniell* se forme par la réunion des éléments, soit en joignant les pôles de même nom pour avoir des quantités d'électricité plus considérables avec la même tension, soit en joignant les pôles de noms contraires pour obtenir des tensions plus grandes avec la même quantité d'électricité (**287** et **288**).

Les éléments de Daniell, représentés dans les figures 26 et 30, ne diffèrent aucunement de celui que nous venons de décrire, quant aux phénomènes chimiques et électriques; ils en diffèrent seulement par la disposition. Dans celui de la figure 26, la vessie est remplacée par un vase poreux de porcelaine dégourdie; alors le zinc est en dedans et le cuivre en dehors; le cuivre est le vase même qui contient la dissolution de sulfate de cuivre. On ménage à la partie supérieure une petite grille mobile pour loger les fragments solides de sulfate de cuivre qui doivent se dissoudre; le vase poreux est rempli d'acide sulfurique étendu ou d'une dissolution étendue de sulfate de zinc, de chlorure de sodium, etc.; le zinc lui-même qui plonge dans cette dissolution est une simple plaque amalgamée.

L'élément de la figure 30, dont on fait particulièrement usage en Allemagne, ne diffère du précédent que par la petite cellule ménagée pour recevoir les fragments de sulfate de cuivre. Au reste, l'élément de Daniell a éprouvé une foule de modifications diverses en ce qui regarde le diaphragme poreux; on a essayé, à cet égard, une foule de substances organiques ou inorganiques: des peaux diverses, du cuir tanné, des toiles serrées de chanvre, du bois, du plâtre, des terres cuites diverses, etc., etc.

Élément de Becquerel ou chaîne simple à oxygène. — Cet appareil a été imaginé par M. Becquerel (Becquerel, *Traité d'électricité*, t. III, p. 292, et t. V, Ire partie, p. 215; et Edmond Becquerel, *Notice sur les piles à courant constant*, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1841, t. III, p. 436); il est ici représenté (Fig. 23): il se compose d'un large tube de verre, dont l'extrémité inférieure est fermée par un *tampon* sur lequel on met un

centimètre d'épaisseur d'argile (kaolin exempt de carbonate de chaux), humectée avec une dissolution de chlorure de sodium; le tube se remplit ensuite d'une *dissolution concentrée de potasse;* ce tube plonge dans un verre rempli d'acide *azotique concentré;* une lame de platine plonge dans la potasse, une autre dans l'acide azotique, et on les met en communication avec des fils de platine. Aussitôt que la communication est établie, l'*oxygène* se dégage en abondance sur la lame de la dissolution de potasse, tandis que l'on voit sur la lame de l'acide azotique cet acide se désoxygéner, passer à l'état d'acide azoteux ou hypoazotique, sans dégagement de gaz. M. Edm. Becquerel ne définit pas d'une manière précise la direction du courant; cependant, M. Becquerel (t. V, p. 216) dit que la lame de l'alcali prend l'électricité négative, et celle de l'acide l'électricité positive; je crois, en effet, que c'est ainsi que les choses se passent.

Pour donner ici une explication nette et complétement satisfaisante des phénomènes qui se produisent dans cet appareil, il me manque plusieurs données qui n'ont pas été recueillies et discutées avec assez de rigueur.

M. Becquerel a réuni plusieurs éléments de cette espèce pour former des piles, et il a constaté en même temps leur puissance, qui est remarquable, et la constance de leurs effets (t. V, I^re^ part., p. 218 et suivantes).

Élément de Bunsen. — Il est représenté dans la figure 31; les deux liquides sont : l'acide azotique du commerce et l'acide sulfurique étendu de 10 à 12 volumes d'eau; les deux corps qui reçoivent l'électricité sont le zinc et le charbon; les liquides sont séparés par un vase poreux de terre cuite *d*, que l'on remplit avec l'acide sulfurique étendu, et dans lequel plonge un manchon de zinc amalgamé *z*; ce diaphragme repose sur le fond d'un vase de verre *vv* qui contient l'acide azotique; dans cet acide, et autour du vase poreux faisant l'office de diaphragme, se place le cylindre de charbon *cc*. Celui-ci est épais, très-résistant et percé de plusieurs trous, pour la libre circulation de l'acide dans lequel il plonge; il se fabrique par des procédés particuliers en pressant dans un moule de fer du coke ou de la houille grasse en poudre, mélangés en proportions convenables, et en soumettant ce mélange dans le moule lui-même à un degré de cuisson convenable; il paraît qu'après lui avoir donné ce premier degré d'agrégation, on le plonge dans une dissolution sirupeuse

pour le soumettre ensuite à la dernière cuisson qui se fait à un feu assez vif. Ces cylindres sont très-bons conducteurs de l'électricité et tout à fait inaltérables dans l'acide nitrique; à leur partie supérieure, et hors du liquide, ils portent un cercle de cuivre sur lequel s'adapte la bande propre à établir les communications électriques.

Le manchon de zinc porte une bande pareille, et c'est par une pince de métal qu'on les réunit pour composer les piles. Quand le zinc est bien amalgamé, il n'éprouve dans l'élément de Bunsen, non plus que dans l'élément de Smée, aucune action tant que la communication n'est pas établie à l'extérieur entre lui et le charbon; mais dès que cette communication est établie, le zinc s'oxyde, le sulfate de zinc se forme, l'acide azotique est en partie désoxygéné, sans qu'il se manifeste un dégagement sensible de gaz, soit sur le charbon dans l'acide azotique, soit sur le zinc dans l'acide sulfurique étendu; en même temps le courant passe dans les conducteurs allant du charbon au zinc, c'est-à-dire que le charbon forme le pôle positif de la pile, et le zinc, comme à l'ordinaire, le pôle négatif.

L'électricité est encore produite ici exclusivement par la décomposition de l'eau, et l'origine de l'action me paraît être aussi dans l'affinité chimique du zinc pour l'oxygène; par cette affinité, soit qu'elle s'exerce effectivement sur quelques atomes d'oxygène, et produise une quantité très-petite d'oxyde, soit qu'elle tende seulement à s'exercer entre toutes les molécules superficielles du zinc et les molécules d'oxygène qui les touchent, la masse du zinc se trouve constituée à l'état négatif, et ici le charbon partage cet état dès qu'il est mis en communication avec lui par des conducteurs extérieurs convenables; alors, comme dans l'élément de Smée, la chaîne liquide peut être décomposée par ses deux extrémités, le zinc prenant l'oxygène, et le charbon ici prenant l'hydrogène; mais cet hydrogène à l'état naissant agit sur l'acide azotique pour lui enlever de l'oxygène, et pour le transformer par conséquent en acide hypoazotique qui se dissout dans le bain. Il ne paraît pas impossible non plus que, sous certaines conditions, l'hydrogène se combine en partie avec le charbon.

L'élément de Bunsen conserve une force sensiblement constante pendant assez longtemps; mais pour ne pas lui donner un volume embarrassant, on a coutume de donner au vase poreux

une capacité insuffisante : le sulfate de zinc qui se forme devient trop vite une proportion considérable du liquide.

La *pile de Bunsen* me paraît être celle qui mérite la préférence, lorsqu'on veut agir avec un grand nombre d'éléments puissants, et obtenir des effets réguliers et constants dont la durée se prolonge pendant plusieurs heures ; il n'y a ici aucun dépôt à enlever et aucun soin assidu à prendre pour maintenir les liquides à l'état de saturation. Lorsqu'on cesse de s'en servir, on jette les diaphragmes dans un baquet d'eau, les zincs dans un autre, et l'on réamalgame ceux qui en ont besoin, ce qui est l'affaire d'un instant.

Je n'ai pas eu occasion de m'apercevoir qu'il se dégageât des vapeurs nitreuses d'une manière incommode.

Éléments de Schœnbein. — M. Schœnbein a obtenu de très-bons effets de deux éléments qui ne sont en quelque sorte que des modifications du précédent. Au lieu d'un vase de verre, M. Schœnbein emploie un vase de fonte rendu *passif*, et c'est dans ce vase qu'il verse, non pas de l'acide nitrique seulement, mais un mélange de 3 parties d'acide nitrique et 1 partie d'acide sulfurique ordinaire ; le cylindre de charbon est supprimé ; le diaphragme poreux, contenant le zinc amalgamé et l'eau acidulée, se place au milieu du vase de fonte, qui devient ainsi le pôle positif de la pile. Dans une autre combinaison, M. Schœnbein remplace le zinc amalgamé par un simple manchon de fonte *non passif* (*Archives de l'électricité*, de M. de La Rive, t. II, page 286). Les actions chimiques sont ici les mêmes que dans l'élément de Bunsen ; du moins je ne suppose pas qu'elles soient modifiées par la présence de l'acide sulfurique dans l'acide nitrique.

Éléments de Grove. — Cet élément, qui est le plus petit de ceux qui ont été imaginés, est représenté dans la figure 29 ; le diaphragme poreux est une *tête de pipe*. Le petit bout de tube qui reste adhérent à la tête est fermé ; ce diaphragme se fixe au milieu d'un verre ordinaire et se remplit d'acide azotique concentré, tandis que le verre contient lui-même de l'acide chlorhydrique ou de l'acide sulfurique étendu, dans lequel plonge du zinc amalgamé. Cet élément ne diffère de celui de Bunsen que par la nature du diaphragme, et aussi par le pôle positif qui est ici une lame de platine. (*Comptes rendus*, 1839, t. VIII, page 269.)

M. Grove a donné à ces éléments une autre disposition, (Fig. 27 et 28); le diaphragme poreux *d* a la forme d'un parallélipipède ; il contient l'acide azotique concentré et la lame de platine; le vase extérieur *vv* contient l'acide sulfurique étendu et la lame de zinc amalgamé *zz* qui se replie sous le diaphragme, et qui, sur les côtés, en reste très-rapprochée. M. Grove fait remarquer avec raison que cet élément perd beaucoup de sa force dès que l'acide azotique est assez affaibli pour qu'il se dégage de l'hydrogène sur le platine.

Quelquefois M. Grove a substitué à l'acide sulfurique de l'acide chlorhydrique étendu de 2 volumes d'eau ; dans ce cas ce n'est plus l'oxygène qui détermine l'action, mais le chlore; l'eau n'est plus décomposée, c'est exclusivement l'acide chlorhydrique dont l'hydrogène vient agir sur l'acide azotique.

Éléments de de La Rive.— M. de La Rive, en adoptant la forme de l'élément précédent de Grove, a eu l'heureuse idée de substituer à l'acide azotique un autre corps conducteur facile à désoxygéner ; il a essayé le peroxyde de plomb qui lui a complétement réussi. L'oxyde de plomb est tassé dans le diaphragme de chaque côté de la lame de platine. M. de La Rive a fait des observations intéressantes, en associant plusieurs éléments à oxyde de plomb, ou l'un de ces éléments avec des éléments de Grove et de Daniell; il a pareillement reconnu que la substitution d'une lame de cuivre à celle de platine diminue l'intensité du courant (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1843, t. VIII, p. 36). On peut espérer que M. de La Rive donnera suite aux expériences curieuses qu'il a déjà faites sur ce sujet, et qu'il expliquera les anomalies remarquables qu'il a eu l'occasion d'observer.

Pile à gaz de Grove.

309. M. Grove est parvenu à construire une pile d'après des données si nouvelles et si inattendues, qu'elle me semble être une découverte des plus intéressantes pour les théories électro-chimiques. Cette pile est représentée (Fig. 35); elle se compose de petites cloches, en partie pleines d'hydrogène et d'oxygène, plongeant dans de l'eau pure légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique. Chaque verre contient deux de ces cloches, l'une d'oxygène, l'autre d'hydrogène, et dans chacune il y a une petite bande de platine platiné qui en occupe à peu près toute la

hauteur. Dans le système qui est représenté sur la figure, ces bandes sortent par le haut des cloches où elles sont hermétiquement scellées; dans d'autres systèmes, M. Grove introduit simplement ces bandes jusqu'au sommet des cloches, et il les replie au sortir de l'ouverture inférieure pour les faire sortir du liquide. La pile se compose en faisant communiquer, par exemple, la bande hydrogène du premier verre avec la bande oxygène du second; puis la bande hydrogène de celui-ci avec la bande oxygène du suivant, et ainsi de suite; les deux bandes extrêmes appartiennent à des gaz différents; celle d'oxygène forme le *pôle positif* de la pile, et celle d'hydrogène le *pole négatif*. Lorsque ces pôles sont mis en communication, ils constituent un courant d'une intensité remarquable; voici les phénomènes que M. Grove a observés avec une batterie de 50 paires (*Trans. phil.*, 1843, et *Archives de l'électricité*, t. III, p. 489) :

1° Une commotion sensible fut éprouvée par cinq personnes qui se tenaient par la main;

2° Un électroscope à feuilles d'or fut fortement affecté;

3° Une étincelle brillante, visible même au grand jour, se manifesta entre deux pointes de charbon;

4° L'iodure de potassium, l'acide chlorhydrique et l'eau acidulée avec l'acide sulfurique furent successivement décomposés.

En même temps que le courant passe et produit ces effets, les volumes des gaz diminuent dans les cloches; ils sont visiblement absorbés, et l'hydrogène plus que l'oxygène.

Dans d'autres séries d'expériences, M. Grove a constaté que le volume d'hydrogène qui disparaît est double du volume d'oxygène; et lorsque la pile est exclusivement employée à décomposer l'eau, les volumes de gaz recueillis dans le voltamètre, tant pour l'hydrogène que pour l'oxygène, sont exactement égaux à la somme des volumes de ces gaz qui disparaissent dans les cloches. Ainsi, pendant son action, l'appareil dont il s'agit recompose une quantité d'eau précisément égale à celle qu'il décompose.

Lorsque les bandes de platine ne présentent aux gaz des cloches qu'une petite surface, l'action est faible, et elle augmente avec l'étendue des surfaces mises en contact avec les gaz.

M. Grove a déjà varié beaucoup ses expériences sur ce sujet

important; mais l'incertitude qui règne encore sur les véritables causes des effets chimiques et électriques qui se manifestent dans son appareil, ne me permet pas d'entrer ici dans l'examen des explications plus ou moins ingénieuses par lesquelles M. Grove et d'autres physiciens ont essayé d'en rendre compte.

310. Pile de Pulvermacher. — M. Pulvermacher a donné à la pile zinc et cuivre une disposition nouvelle et ingénieuse qui est représentée (Pl. 24, Fig. 12, 13); les éléments de cette pile sont fabriqués de la manière suivante : une longue tige de bois convenablement préparée est recouverte mécaniquement d'un fil de zinc et d'un fil de laiton qui ne se touchent pas, mais qui sont très-près l'un de l'autre, un peu incrustés dans le bois par la pression qui les enroule. Une fois recouverte, cette tige est coupée en morceaux d'environ 2 centimètres de longueur, contenant, par exemple, 10 tours de chaque fil; à un bout le fil de zinc est libre, tandis que le fil de cuivre vient s'attacher à un petit crochet de cuivre planté dans l'axe du bois; à l'autre bout c'est le contraire, le fil de laiton est libre, c'est le fil de zinc qui vient par son extrémité se souder à un autre petit crochet planté dans l'axe; ensuite en accrochant les morceaux les uns aux autres dans un ordre convenable, c'est-à-dire de manière que le crochet de zinc du premier élément reçoive le crochet de cuivre du deuxième, et ainsi de suite, on forme une chaîne de 10, 20, 30 ou même 100 éléments. Pour amorcer cette pile d'un nouveau genre, il suffit d'humecter la chaîne avec un peu d'eau légèrement acidulée à l'acide acétique; alors on reçoit une vive commotion lorsqu'on vient en toucher les deux extrémités avec la main; ces commotions persistent tant que la chaîne est humide.

A cette invention, M. Pulvermacher en a joint une autre : c'est un moyen mécanique des plus ingénieux pour régler l'intensité du courant, ou plutôt la force de la commotion; ce régulateur était indispensable pour l'usage médical auquel cette pile est particulièrement destinée.

§ 4. *Affinités chimiques modifiées par la lumière et par l'électricité.*

311. La lumière excite un courant électrique dans les substances photographiques. — On peut appeler *substances photographiques* celles qui éprouvent, sous l'influence de la lu-

mière, des changements perceptibles, soit dans leur état moléculaire, soit dans leur coloration ; ainsi les sels d'argent sont, en général, des substances photographiques, puisqu'ils accusent la présence de l'action de la lumière par des changements de couleur plus ou moins rapides ; on les appelle aussi *substances sensibles*, *substances impressionnables*, comme pour indiquer qu'elles conservent des traces de la lumière qui les a frappées. On ne sait pas quel est le caractère de ces phénomènes : quand le chlorure d'argent, par exemple, qui est d'un blanc si pur, au moment où il est précipité d'une dissolution d'azotate d'argent passe au violet plus ou moins foncé, par l'action seule de la lumière, on ne sait pas quelle est la nature des changements qui se sont accomplis. Le chlorure coloré est-il chimiquement ce qu'il était auparavant ? a-t-il perdu quelques-uns de ses éléments? a-t-il reçu des éléments nouveaux ? C'est ce que l'on ne sait pas jusqu'à présent d'une manière certaine.

Il était donc très-intéressant de rechercher si ces phénomènes sont accompagnés d'un dégagement d'électricité ; et M. Ed. Becquerel a résolu cette question par des expériences délicates et habilement conduites (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. IX, XXII, XXV et XXXII et *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. IX et XIII). Voici le procédé auquel il a définitivement donné la préférence. Des plaques d'argent parfaitement pur, de 5 centimètres de hauteur, 3 centimètres de largeur et $\frac{1}{4}$ de millimètre d'épaisseur sont soudées à de petites tiges d'argent pur (Pl. 24, Fig. 19) qui servent à les soutenir dans les bains où elles doivent être placées, et à établir les communications électriques. Ces lames polies avec soin et parfaitement nettes sont d'abord chlorurées par l'action de la pile : pour cela on les suspend dans un bain d'eau contenant $\frac{1}{8}$ ou $\frac{1}{[illegible]}$ en volume d'acide chlorhydrique, en les mettant en communication avec le pôle positif d'un élément Bunsen ordinaire ; aussitôt, on plonge dans le bain, et à une distance assez grande, un fil de platine communiquant au pôle négatif de l'élément ; l'action commence, la lame se colore, passe par diverses nuances que l'on observe à la lumière diffuse du laboratoire, qui ne doit pas être trop éclairé. Lorsqu'on voit paraître le violet du 4ᵉ ou du 5ᵉ ordre, on arrête l'action, qui dure environ 1′, et la lame, retirée du bain, est soigneusement lavée et séchée. La seconde opération est celle du *recuit*, elle exige de grandes précautions ; elle con-

siste à exposer la lame pendant quelque temps à une température de 150 ou 200°, jusqu'à ce qu'elle devienne *rosâtre*. Cela fait les lames sont préparées : on en prend deux pareilles, on les plonge l'une devant l'autre, dans une petite cuve de verre (Pl. 24, Fig. 19), qui contient un bain composé de 100 grammes d'eau et un gramme de sulfate de potasse, ou un gramme d'acide sulfurique à 66° ; ces liquides sont assez bons conducteurs, et surtout à cause du recuit, ils n'agissent pas sensiblement sur la couche superficielle de chlorure d'argent. La cuve de verre est disposée dans la chambre noire, le rayon solaire doit, tout à l'heure, entrer par une de ces faces et frapper seulement la première lame, sans arriver à la seconde ; pour cela les trois autres faces sont couvertes, et celle qui donne accès à la lumière est munie d'un écran portant une fente d'environ 4 centimètres de hauteur et dont la largeur, toujours moindre que celle de la lame, se règle au moyen d'une coulisse et d'une vis. Un multiplicateur de Ruhmkorff, de 3000 tours, est mis en communication avec les deux lames, par des tiges de cuivre, et l'on attend que l'équilibre soit bien établi. La sensibilité du multiplicateur est telle, qu'il s'agite longtemps, par les faibles courants qui se développent, même dans les ténèbres, à cause des inégalités presque inévitables que présentent les lames ; quelquefois il faut attendre l'équilibre pendant plus de douze heures. Enfin lorsqu'il est décidément établi, on fait agir la lumière, et l'on aperçoit à l'instant une vive action qui se manifeste, l'aiguille est déviée de 20 ou 25° par première impulsion, parce que l'on a réglé l'écran pour que la déviation permanente se maintînt autour de 15°. Ainsi un courant se produit au moment même où la lumière vient exercer son action sur la couche impressionnable ; ce courant est persistant, son intensité se soutient, à peu près égale, pendant des heures entières, surtout quand la couche sensible a le degré d'épaisseur convenable. Si l'on ferme l'écran, le courant cesse, l'aiguille revient au zéro ; elle reprend, au contraire, sa déviation au moment où l'on redonne à l'écran le même degré d'ouverture.

La sensibilité de l'appareil est assez grande pour que la lumière d'une bougie placée à 10 centimètres de la cuve à eau et par conséquent à 12 ou 13 centimètres de la première lame, donne une déviation permanente de 12 ou 15°, quand elle agit en plein sur les 20 centimètres carrés superficiels de cette lame.

Quant à la direction du courant, M. Ed. Becquerel fait cette remarque qui a, je crois, de l'importance : lorsqu'il a opéré avec des lames préparées à l'iodure, au bromure, ou au chlorure et non recuites, la lame impressionnée a pris constamment l'électricité positive; au contraire, les lames chlorurées et recuites lui ont toujours donné un courant inverse, la lame impressionnée prenant alors l'électricité négative. M. Ed. Becquerel, en lavant soigneusement, avec l'ammoniaque ou le sulfhydrate de soude la lame qui avait reçu longtemps l'action de la lumière, a reconnu des traces d'action chimique, ou un sous-chlorure, ou de l'argent métallique; il ne dit rien de l'état de la seconde lame; cependant, il me paraît présumable que le courant, quelque faible qu'il soit, n'a pas traversé le liquide sans y opérer une décomposition correspondante à son intensité; et, s'il en est ainsi, l'une des lames a dû recevoir de l'hydrogène et l'autre de l'oxygène. C'est peut-être dans cette circonstance qu'il faudrait chercher l'opposition observée entre les lames recuites et non recuites; alors la lumière ne serait qu'un excitant, analogue à la chaleur dans les courants thermo-électriques, et il faudrait se garder de conclure que les altérations chimiques observées sont l'effet direct de la lumière.

M. Ed. Becquerel a fait de nombreuses expériences pour savoir si l'intensité du courant était proportionnelle ou à l'intensité de la lumière, ou à l'étendue de la lame qu'elle frappe; mais les résultats ne présentent à cet égard aucune loi régulière; seulement les radiations invisibles à l'œil n'exercent aucune action sur les lames recuites, et l'efficacité des radiations visibles augmente avec leur intensité, sans que la réfrangibilité semble y jouer un rôle spécial.

312. L'électricité modifie les affinités chimiques. — M. Schœnbein a attaché son nom à une découverte importante, celle de l'*ozone*.

Qu'est-ce que l'ozone? M. Schœnbein a donné ce nom à l'oxygène que l'on recueille au pôle positif de la pile, avec un électrode d'or ou de platine. Le gaz ainsi obtenu a une odeur caractéristique : elle rappelle l'odeur qui se répand autour de la machine électrique et dans tout l'appartement quand on a fait jaillir un grand nombre d'étincelles; elle rappelle l'odeur qui accompagne les décharges des grandes batteries électriques; elle rappelle cette odeur de soufre et de phosphore qui accom-

pagne au loin l'explosion de la foudre lorsqu'elle vient frapper les objets terrestres ; elle rappelle enfin ce que, dans le siècle dernier, on était convenu de nommer l'odeur de la *matière électrique*.

Quelques personnes ont pu croire que M. Schœnbein avait simplement imposé un nom à une chose très-anciennement connue ; mais, à mon avis, il a procédé d'une manière plus logique : il a imposé un nom à une chose qu'il ne connaissait pas, que personne ne connaissait, et qui, par son origine, parfaitement définie, pouvait être et devait être, suivant toute probabilité, très-différente de l'ancienne matière électrique. Il a eu raison de voir là un principe nouveau, de le signaler à l'attention des physiciens, de s'attacher avec une rare sagacité et avec une persévérance plus rare encore à démêler des propriétés qui apparaissaient comme enveloppées d'un impénétrable mystère. Grâce aux expériences de M. Schœnbein, et à celles qu'il a provoquées, ce mystère commence à s'éclaircir ; dans un excellent travail sur ce sujet, MM. Marignac et de La Rive ont été conduits à cette conclusion : que l'ozone *est de l'oxygène dans un état particulier d'activité chimique qui lui est imprimé par l'électricité*.

M. Schœnbein adopte cette opinion qui se trouve de plus confirmée par le travail plus récent que MM. Fremy et Ed. Becquerel ont présenté à l'Académie des sciences le 15 mars 1852 (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. XXXIV, et *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXV).

Dans le résumé très-succinct que je puis donner ici j'emprunterai surtout les appareils et les expériences de MM. Fremy et Ed. Becquerel, parce qu'en s'aidant, comme ils l'ont fait, de toutes les recherches antérieures, ils ont pu suivre une route plus directe ; je dois ajouter cependant que la méthode de MM. de La Rive et Marignac est aussi très-directe et très-concluante.

Propriétés caractéristiques de l'ozone. — Il est fortement odorant ; il est un oxydant très-énergique, dans des circonstances où l'oxygène ordinaire est inactif ; ses propriétés oxydantes exigent le concours de l'humidité ; une température d'environ 300° le transforme en oxygène pur.

Par exemple, à la température ordinaire, il produit très-rapidement les effets suivants :

Il rend l'iode libre dans l'iodure de potassium;

Il oxyde le fer, le zinc, l'argent, le mercure;

Il noircit le sulfate et l'acétate de manganèse, en produisant de l'hydrate de sesquioxyde;

Il transforme le protoxyde de plomb en minium hydraté;

Il altère le caoutchouc et le rend cassant.

Mais lorsqu'à l'état sec on le met en contact avec ces diverses substances pareillement sèches, il cesse d'agir et ne se distingue plus que par son odeur.

Ces propriétés peuvent se démontrer au moyen de l'appareil suivant (Pl. 24, Fig. 20); l'eau acidulée soumise à l'action de la pile est contenue dans un tube en U, *acb*, plongé lui-même dans un bain d'eau froide pour empêcher l'échauffement; le courant d'une forte pile arrive par des fils de platine aux électrodes qui sont des lames de même métal; l'hydrogène se dégage au dehors; l'oxygène est conduit dans trois tubes laveurs *v*, pour arriver au tube horizontal *t*, droit ou un peu courbé au milieu, qui reçoit les substances soumises à l'action de l'ozone. Le premier tube laveur donne des traces sensibles d'acide sulfurique, mais le troisième n'en donne plus; il faut, à la suite de celui-ci, établir les tubes desséchants, ou un tube chauffé lorsqu'on veut agir sur l'ozone sec, ou sur l'ozone transformé par la chaleur.

Il est bon de faire passer un courant d'oxygène pur dans l'appareil avant de mettre l'eau acidulée, afin de le purger d'air complétement.

Quelles que soient l'énergie de la pile et la durée de l'opération, il n'y a jamais qu'une très-petite proportion d'ozone dans l'oxygène qui se dégage au pôle positif; car, si l'on en prend un volume donné pour l'agiter avec une dissolution d'iodure de potassium, l'absorption est à peine sensible; cependant l'iodure brunit et le gaz qui reste n'est plus que de l'oxygène, qui a perdu son odeur et sa propriété oxydante.

Les étincelles de la machine donnent à l'oxygène les caractères de l'ozone. — Un tube vertical (Pl. 24, Fig. 16), contient en haut deux fils de platine qui passent au travers du verre, leurs extrémités intérieures se trouvant à une distance plus ou moins grande, suivant la longueur que l'on veut donner à l'étincelle; le tube, rempli d'oxygène pur, est placé sur une dissolution d'iodure de potassium, dont la surface extérieure est recou-

verte d'une couche épaisse d'huile pour empêcher l'accès de l'air et l'absorption de l'azote. On fait passer les étincelles de la machine et l'on ne tarde pas à voir la colonne d'iodure s'élever progressivement ; après quelques heures l'absorption est très-sensible, et la dissolution se colore de plus en plus ; on peut continuer l'expérience assez longtemps, pour qu'il ne reste plus en haut qu'une petite bulle d'oxygène.

En substituant l'eau bouillie à la dissolution d'iodure il n'y a aucune absorption ; cependant l'oxygène prend très-fortement l'odeur de l'ozone.

Les expériences comparatives sur les dissolutions iodurées font voir que l'action est plus prompte dans les tubes où l'étincelle a 25 millimètres de longueur que dans ceux où elle a seulement 4 ou 5 millimètres, les tubes étant successifs et la quantité d'électricité la même.

Dans les tubes précédents, quand on substitue l'eau à la dissolution d'iodure et quand on dispose une lame d'argent destinée à recevoir l'action de l'ozone, on constate l'oxydation progressive de l'argent par l'ascension de la colonne d'eau ; il paraît cependant que l'absorption est ici moins rapide ; même quand les deux tubes, d'argent et d'iodure de potassium, sont successifs et reçoivent le même nombre d'étincelles de même longueur.

Ce système d'expériences montre, d'une manière évidente, que l'ozone n'est autre chose que l'oxygène ayant reçu par l'électricité une activité chimique particulière, conformément aux conclusions de MM. de La Rive et Marignac ; car, si l'on voulait, à toute force, élever une objection en disant qu'il y a peut-être de l'azote ou de l'air atmosphérique, soit dans l'eau bouillie, qui est au-dessous de l'argent, soit dans la dissolution d'iodure de potassium, il suffirait pour y répondre de comparer le volume d'oxygène absorbé au volume possible de l'azote.

Cependant MM. Fremy et Ed. Becquerel ont pensé qu'ils lèveraient mieux tous les doutes en enfermant l'argent et la dissolution d'iodure de potassium dans des tubes de verre scellés à la lampe ; deux fils de platine arrivant à une certaine distance dans l'intérieur de ces tubes pour déterminer le passage de l'étincelle de la machine. Alors le vide se fait à mesure que l'oxygène est ozoné par l'étincelle, et il suffit de briser sous l'eau la pointe de ces tubes pour mesurer le degré d'absorption. Lorsqu'on agit ainsi sur l'iodure de potassium le vide se reconnaît à l'éclat de

l'étincelle; car on voit qu'après quelques heures elle est affaiblie au point d'être à peine visible, elle n'a plus à traverser que le vide; et en ouvrant le tube sous l'eau, on a en effet la preuve que l'absorption de l'oxygène a été complète.

Que l'oxygène purifié vienne du chlorate de potasse, de l'oxyde de mercure ou du peroxyde de manganèse, les effets sont les mêmes.

Puisque l'oxygène n'est jamais ozoné, que partiellement, lorsqu'il ne trouve pas un corps sur lequel il puisse se porter immédiatement, il paraît probable, à MM. Fremy et Becquerel, que l'action de l'étincelle peut à la fin ôter à l'oxygène ozoné la propriété qu'elle lui avait d'abord communiquée, et produire ainsi les deux effets contraires, suivant les circonstances.

Ces expériences, comme celles de MM. de La Rive et Marignac, démontrent donc, par rapport à l'ozone, ce premier point fondamental : que l'ozone n'est autre chose que de l'oxygène ayant reçu de l'électricité une activité chimique particulière.

MM. Fremy et Becquerel proposent de supprimer le nom d'ozone et de le remplacer par celui d'*oxygène électrisé*. Je ne vois à cela aucun avantage : la science a adopté depuis dix ans le nom primitif donné par M. Schœnbein, l'auteur de la découverte, qui ne savait pas, il est vrai, comment l'ozone était composé, mais qui en avait établi les propriétés caractéristiques, par diverses séries d'expériences très-remarquables; pourquoi aujourd'hui effacer cette origine en substituant à cette dénomination juste, une dénomination qui aurait quelque chose de faux, puisque tout oxygène électrisé n'est pas nécessairement de l'oxygène ayant les propriétés dont il s'agit. S'il arrive, ce qui est présumable, que d'autres corps reçoivent aussi par l'électricité des modifications analogues, pourquoi ne pas dire alors de l'oxygène ozoné, du *soufre ozoné*, même quand il n'aurait aucune odeur particulière, plutôt que du *soufre électrisé*, qui ferait une étrange équivoque?

MM. Fremy et Becquerel ont habilement recherché les divers modes par lesquels l'électricité peut imprimer à l'oxygène ces propriétés nouvelles; ils ont en conséquence soumis à l'épreuve les étincelles produites de diverses manières par la rupture d'un circuit voltaïque. Deux appareils ont servi à ces recherches; le premier est l'appareil d'induction de Ruhmkorff, que nous décrivons plus loin (Pl. 25, Fig. 13), et qui a la propriété remarquable de

produire, avec deux éléments Bunsen ordinaires, des effets de lumière dans l'œuf philosophique, qui ne sont ni moins éclatants ni moins intenses que ceux que l'on peut obtenir des plus fortes machines électriques; le second appareil est le gros électro-aimant du Jardin des Plantes.

L'appareil de Ruhmkorff donne dans l'oxygène sous la pression ordinaire des étincelles de 3 ou 4 millimètres de longueur qui se succèdent avec une excessive rapidité; ces étincelles produisent sur l'oxygène le même effet que celles de la machine; cependant quand l'appareil est trop actif et les étincelles trop rapides, cette action s'affaiblit beaucoup, ce qui résulte vraisemblablement de l'élévation de température aux points de jonction des pièces mobiles.

Le gros électro-aimant était employé de la manière suivante: un tube de verre représenté en plan et en élévation (Pl. 24, Fig. 17), contient dans son axe un long fil de platine *bdf*, articulé en *d* et terminé en *f* par une masse de fer recouverte d'émail; sa portion mobile repose sur un second fil de platine transversal *gh*; les appendices effilés, *a* et *c* servent à introduire les gaz et sont ensuite scellés à la lampe. Un courant de 20 éléments Bunsen passe dans l'électro-aimant et vient traverser le fil de platine intérieur de *x* en *y* ou de *y* en *x*, le point de croisement du fil longitudinal et du fil transversal établissant la communication. Mais l'électro-aimant disposé au-dessus de la masse de fer *f*, la soulève ainsi que le fil qui la porte, le courant est rompu, l'étincelle jaillit, alors la masse de fer retombe, rétablit les communications, qui sont presque à l'instant rompues de nouveau et ainsi de suite. Dans ce mode d'action l'oxygène n'est point modifié, mais cela tient, sans aucun doute, à une trop grande élévation de température, puisque cette étincelle ne diffère que par l'intensité de celle de l'appareil de Ruhmkorff. Une preuve de la haute température est la fusion du fil de platine au point de croisement quand l'expérience a été prolongée pendant environ une demi-heure.

Cet appareil a donné cependant d'autres résultats curieux: quand le tube contient de l'air au lieu d'oxygène, on voit promptement les vapeurs rutilantes du gaz nitreux formé par le passage de l'étincelle; quand le tube contient 3 volumes d'hydrogène et 1 volume d'azote avec un papier réactif, on ne tarde pas à voir le papier accuser la présence de l'ammoniaque; on produit de

même l'acide sulfurique anhydre avec le gaz sulfureux et l'oxygène.

La formation du gaz nitreux me semble remarquable en ce qu'elle a lieu sans l'intervention de l'oxygène ozoné.

Il paraît donc que l'électricité modifie les affinités chimiques de diverses manières :

1° En déterminant la combinaison brusque et totale dans certains mélanges détonants ;

2° En déterminant la désunion de certains composés et l'union partielle et progressive de certains éléments, mis en présence ;

3° En donnant à l'oxygène une aptitude particulière à faire des combinaisons ; aptitude qu'il prend et qu'il conserve sans être en présence des éléments sur lesquels il doit agir. Ce qui constitue l'oxygène ozoné.

De plus, il importe de remarquer que M. Schœnbein est parvenu à faire, sans l'intervention directe de l'électricité, de l'oxygène ozoné jouissant de toutes les propriétés de celui qui a subi l'influence électrique ; il obtient ce résultat en laissant pendant quelque temps l'oxygène ou l'air en contact avec du phosphore humide à la température de 20 ou 25°. Il est certain du moins que cette action chimique donne à l'air ou à l'oxygène, l'odeur caractéristique de l'ozone, la propriété d'agir rapidement sur le papier amidonné et imprégné d'un peu d'iodure de potassium, et la propriété d'oxyder le mercure et l'argent. On pourrait aujourd'hui déterminer la proportion d'oxygène qui est ainsi transformée et les principales circonstances qui peuvent l'augmenter ou la diminuer ; on pourrait vérifier pareillement si l'oxygène modifié par l'électricité possède comme l'oxygène modifié par le phosphore la propriété de repasser à l'état d'oxygène ordinaire par le simple contact du charbon, sans qu'il y ait d'action chimique en jeu.

§ 5. *Diverses applications de l'électricité voltaïque.*

313. Plusieurs physiciens avaient remarqué qu'en révivifiant les métaux par l'action du courant électrique, comme nous l'avons vu dans ce qui précède, on obtient des dépôts d'apparence et de constitution moléculaire très-différentes. Quelquefois le métal se présente sous la forme d'une poudre noire incohérente, semblable à la plus fine poussière de charbon, ou plutôt de noir de fumée ; d'autres fois, c'est une poudre qui a bien quelque chose de mé-

tallique, mais qui ne montre cependant aucune cohésion; d'autres fois enfin, il se présente sous sa forme ordinaire, avec sa couleur, son éclat, sa ténacité et toutes ses autres propriétés; l'arbre de Saturne en est un exemple. L'invention de la pile de Daniell, par les dépôts de cuivre qu'elle donne sans cesse, a eu l'avantage de mettre en quelque sorte, chaque jour, ce phénomène sous les yeux des physiciens. M. Spencer en Angleterre, et M. Jacobi en Russie, sont les premiers qui aient eu l'heureuse idée de l'observer avec attention, pendant les années 1837 et 1838, et ils ont l'un et l'autre saisi avec habileté le germe des nombreuses applications qu'il pouvait offrir aux arts. En se déposant, sous certaines conditions, le cuivre prend avec une étonnante exactitude la forme des corps qui le reçoivent; il se moule sur eux avec autant, avec plus de fidélité que la cire la plus propre à recueillir des empreintes; et cependant il prend et conserve toutes ses propriétés métalliques, et surtout sa dureté et sa malléabilité. C'est ce fait qui est devenu fécond et qui a donné naissance à l'art nouveau de la *galvanoplastique*.

Je dois ajouter ici que je partage l'avis de ceux qui adoptent cette expression pour désigner d'une manière générale tous les dépôts faits au moyen de l'électricité, et qui prennent la forme de l'électrode ou du corps qui les reçoit; ce qui n'empêche aucunement que l'on n'emploie d'autres expressions plus restreintes pour désigner des dépôts qui se distinguent par leur destination ou par leurs caractères. Dans cette manière de voir la galvanoplastique comprend : la galvanoplastique proprement dite, qui se rapporte aux statues, aux bas-reliefs, aux médailles, etc.; la *galvanotypie* ou *électrotypie*, qui se rapportent aux clichés, aux planches gravées, et en général à tous les objets qui sont destinés à transporter leurs empreintes sur d'autres corps, par la pression : la dorure, l'argenture, le platinage, le cobaltage, le zincage, etc., les dépôts d'oxyde, etc.; en un mot, les *dépôts préservateurs*, qui s'appliquent à la surface des corps, comme un vernis, non-seulement pour leur donner du lustre et de l'éclat, mais encore ponr les rendre plus inaltérables.

D'après ces divisions, nous allons essayer de donner une idée succincte de ces diverses branches de la galvanoplastique.

314. Galvanoplastique. — Ce que nous venons de dire suffit pour faire comprendre qu'il n'est pas un objet, pas un corps inorganique ou organique qui ne puisse être couvert d'une cou-

che de cuivre continue qui l'enveloppe de toutes parts, et qui cependant soit assez mince pour lui conserver tous ses linéaments, tous ses traits les plus délicats. Prenons pour exemple une statuette de plâtre, et voyons comment nous pourrons lui donner l'apparence d'une statuette de cuivre. Il suffit évidemment pour cela de la plonger dans une dissolution de sel de cuivre, sulfate, azotate, etc. (on préfère en général le sulfate), et de faire qu'elle devienne l'électrode négatif d'une pile, dont l'électrode positif plonge dans la dissolution. Aussitôt que le courant est établi, le cuivre va se déposer sur cet électrode en couche infiniment mince d'abord, puis progressivement croissante, et quand elle aura acquis l'épaisseur voulue, il suffira de faire cesser l'opération, de retirer la statuette, de la laver et de l'essuyer. Si l'opération a été bien conduite, il y aura partout une couche égale de cuivre, de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur suivant l'intensité du courant et la durée de son action.

Rien ne paraît plus simple; il y a cependant diverses conditions de succès qu'il faut maintenant indiquer :

1° Le cuivre se dépose sur l'électrode quand il est conducteur; mais le plâtre est un mauvais conducteur, sur lequel il ne se pourrait faire que des dépôts irréguliers. Il faut donc avant tout rendre sa surface parfaitement et également conductrice. On y parvient de plusieurs manières, par exemple, avec de la mine de plomb en poudre excessivement ténue qui s'applique tantôt à la brosse, tantôt au blaireau, ou avec de la poudre d'argent, ou par d'autres préparations analogues; c'est ce qu'on appelle *métalliser* les surfaces.

2° Le cuivre se dépose souvent en parcelles sans cohésion, et il importe ici que la feuille de cuivre soit dure et malléable. Les qualités du dépôt dépendent surtout de l'intensité du courant, de la température du bain, et de son degré de saturation : en général, les courants faibles donnent un cuivre si malléable qu'il se coupe au couteau; pour un courant plus fort, le dépôt est plus dur; en passant cette limite, il devient cassant, puis granuleux, cristallin, rugueux; puis enfin pulvérulent et sans cohésion suffisante : il faut donc choisir le nombre des éléments convenable, et, sous peine d'échouer, observer l'intensité du courant dans ses rapports avec la température, le degré de saturation de la dissolution et son degré d'acidité.

3° A mesure que le dépôt se fait, la dissolution s'appauvrit;

ainsi la nature du dépôt doit changer, à moins que l'on ne règle l'intensité du courant sur le degré de saturation. Mais il y a une ingénieuse invention qui remédie à ces accidents, c'est celle de l'*électrode soluble :* on emploie pour électrode positif des lames de cuivre qui s'oxydent et passent à l'état de sulfate; ainsi l'électrode positif redonne, au bain, autant de métal que l'électrode négatif lui en enlève, ou du moins si la compensation n'est pas exacte, elle est assez approchée pour conserver au dépôt son caractère.

4° Il importe que le dépôt soit exactement uniforme, et s'accroisse avec une vitesse égale sur tous les points de la surface : on y parvient en multipliant d'une part les points d'attache de l'électrode négatif avec les fils qui vont au pôle négatif de la pile, et d'autre part en multipliant aussi les électrodes solubles positifs, avec l'attention de les présenter à l'électrode négatif à des points divers et habilement choisis, et surtout à des distances convenables, car l'intensité des courants dérivés qui se forment alors est plus ou moins influencée par les distances. On a remarqué aussi que la forme même des objets et la courbure des surfaces facilitent plus ou moins les dépôts; ainsi ils tendent à se faire en général sur les parties saillantes, et il faut des soins particuliers pour déterminer leur formation dans les creux.

5° Si l'objet que nous avons pris pour exemple était de nature à s'imprégner de la dissolution de sulfate de cuivre, pendant le temps qu'il y reste plongé avant d'être totalement recouvert, il faudrait empêcher cette absorption en préparant l'objet de manière à lui donner une imperméabilité suffisante.

Tels sont, en général, les principes au moyen desquels on est parvenu à couvrir de cuivre, avec une perfection étonnante, non-seulement des statuettes, ou de très-grandes statues, mais les corps les plus variés : des fruits de toute espèce, des branches, des feuilles, des fleurs, des animaux même, des poissons, des crustacés, des oiseaux, etc., etc. Mais, il ne faut pas s'y méprendre, il y a, pour parfaitement réussir, une sorte d'habileté que l'on n'acquiert que par la pratique.

On comprend d'avance comment, par le même moyen, l'on peut reproduire aisément chacune des faces d'une médaille métallique : ici l'électrode est par lui-même un excellent conducteur; il suffit donc de couvrir de cire celle des deux faces dont on ne veut pas prendre le creux, et de procéder comme nous

l'avons dit. On aura bientôt un excellent creux de la médaille, qui servira à son tour de moule pour reproduire le relief. Mais il se présente ici une difficulté nouvelle : il ne suffit pas de faire le dépôt, il faut le séparer du moule, et les obtenir l'un et l'autre parfaitement intacts; la difficulté semble d'autant plus grande que, si le moule n'a pas sa surface vive et métallique, on peut craindre qu'il ne cesse d'être assez bon conducteur. Cependant, par divers artifices, on est parvenu à concilier ces deux conditions en quelque sorte opposées : on met sur la surface du moule une sorte de *voile* qui empêche l'adhérence trop complète, sans empêcher le dépôt de se faire avec une parfaite exactitude : tantôt c'est une couche imperceptible de cire ou de corps gras, tantôt, comme l'a imaginé M. Boquillon, c'est le dépôt léger et presque invisible que peut faire en un instant la fumée blanche produite par la combustion d'un corps résineux.

Enfin, si l'original dont on veut avoir la représentation fidèle n'est pas de nature à être exposé lui-même dans la dissolution, l'on en relève l'empreinte avec de la cire, avec du plâtre, etc., ou avec un métal, à la manière des clichés, plomb, alliage fusible, etc. Alors, suivant la nature de cette empreinte, on la métallise si elle n'est pas conductrice, et on la *voile* si elle est métallique.

Une statue de bronze, de marbre ou de plâtre, peut pareillement être reproduite : pour cela il faut en faire le creux par fragments, soit en plâtre, soit d'une autre manière, repérer tous les fragments et les réunir; alors c'est dans ce creux qu'il faut mettre la dissolution, et ajuster les électrodes positifs, assez habilement pour donner au relief une épaisseur égale. Quand l'opération est faite, il reste à dépouiller le moule extérieur. D'autres fois, au lieu d'exécuter tout d'une pièce, on exécute par parties qui se réunissent ensuite.

Pour mieux faire comprendre ces principes généraux, nous avons représenté (Pl. 24, Fig. 10) l'appareil qui sert aux petites opérations de galvanoplastique, par exemple, à la reproduction de l'une des faces d'une médaille. Après avoir pris, à l'alliage fusible, l'empreinte exacte de cette face, on a un cliché en creux dans lequel se doit faire le relief; on couvre d'abord de cire ou de vernis toute la surface du cliché où l'on ne veut pas recevoir de dépôt, ainsi que la portion inférieure de la tige *b*, qui sert à le supporter dans le bain; ensuite, après avoir bien nettoyé à la

brosse toute l'étendue de la surface qui doit recevoir le dépôt, on lui donne le voile destiné à empêcher l'adhérence métallique trop complète. Cela fait, on le plonge dans le bain de sulfate de cuivre, vis-à-vis une plaque de cuivre rouge ayant à peu près les mêmes dimensions, soutenue par un fil *c* et faisant l'office d'électrode soluble ; alors on établit les communications avec un élément Bunsen, la plaque de cuivre recevant le pôle positif, le cliché recevant le pôle négatif, et l'on abandonne l'opération à elle-même pendant un jour ou deux, suivant l'épaisseur que l'on veut donner au dépôt, il ne reste plus qu'à retirer le cliché et à séparer le dépôt de la surface qui l'a reçu ; s'il n'y a eu ni adhérence ni déchirure, elle n'a besoin que d'être essuyée et flambée pour recommencer une opération nouvelle.

M. Gueyton s'est distingué parmi les plus habiles fabricants qui ont élevé de grands ateliers pour faire des produits de galvanoplastique ; il a introduit dans ce genre de fabrication de nombreux et remarquables perfectionnements, surtout en ce qui touche à la préparation des moules destinés à recevoir les dépôts. Il est parvenu de diverses manières, et particulièrement par l'emploi de la gutta-percha, à faire des moules ayant la double propriété de prendre avec une admirable netteté les empreintes les plus délicates et d'être élastiques comme du caoutchouc. On comprend de suite que des moules de cette espèce offrent à l'art des ressources infinies, puisqu'il n'y a plus, en quelque sorte, à s'occuper de la dépouille, la matière du moule se retire des creux et reprend sa forme. On obtient par là tous les avantages que l'on a su tirer, dans ces derniers temps, du moulage à la gélatine.

C'est ainsi que M. Gueyton est parvenu à reproduire, avec une prodigieuse économie et une fidélité parfaite, le travail du repoussé au marteau, de la ciselure, des vases et des ornements les plus précieux et les plus recherchés.

On voit (Pl. 24, Fig. 15) une des grandes cuves remplie d'une dissolution de sulfate de cuivre, dans lesquelles M. Gueyton fait ses travaux de galvanoplastique. La tringle du milieu *ss* sert à supporter les électrodes solubles ; les deux tringles latérales *m m* et *m' m'* servent à supporter les moules qui sont, dans une même opération, soumis à l'action du courant. La figure suppose que la partie antérieure de la cuve a été remplacée par une glace, afin de laisser voir l'intérieur.

C'est toujours par l'application de la mine de plomb que les moules sont rendus conducteurs.

On voit en même temps (Fig. 11) la disposition de l'élément à auge de gutta-percha dont M. Gueyton obtient un service très-économique.

315. **Électrotypie.** — On a essayé de reproduire par la galvanoplastique les planches gravées sur cuivre, soit pour les estampes, soit pour les cartes géographiques, les planches gravées sur acier, les planches de plaqué du daguerréotype, les clichés, et même des dessins exécutés sur métal au moyen de compositions particulières.

Planches de taille-douce. On obtient quelquefois des résultats assez satisfaisants, en préparant une planche en taille-douce comme nous l'avons dit précédemment pour les moules, et en la plongeant dans la dissolution pour faire directement le dépôt sur elle; d'autres fois on prend le relief de la planche par la pression, soit avec des lames de plomb, soit par la méthode des clichés. Mais, jusqu'à présent, l'industrie n'a pas tiré grand profit de ces essais.

Planches d'acier. On ne peut pas, en général, les mettre directement dans la dissolution de sel de cuivre; alors on les traite par la dissolution du cyanure double d'argent et de potassium, et l'on dépose ainsi de l'argent au lieu de cuivre; ce relief d'argent, détaché et porté lui-même dans le bain de sulfate de cuivre, reproduit fidèlement le creux de la planche primitive.

Les *planches daguerriennes*, traitées directement ou indirectement, n'ont pas donné, jusqu'à présent, des résultats qui promettent un prochain avenir à ce genre de reproduction.

Les *clichés*, les *vignettes typographiques* se reproduisent très-fidèlement; mais la galvanoplastique se trouve ici en concurrence avec des procédés nombreux et très-économiques.

Dessins ou *électro-tint.* M. Kobbel de Munich a imaginé de dessiner sur un métal convenable, avec du vernis de graveur ou quelque autre composition analogue, en variant les tons par l'épaisseur des couches; alors il prépare la plaque et au besoin *métallise* le dessin; puis, en la mettant dans la dissolution de cuivre, il fait sur elle un dépôt qui devient ainsi une sorte de *planche gravée* propre à reproduire le dessin.

Dans tout ce qui précède, nous n'avons parlé que de dépôts de cuivre; mais il y a d'autres métaux qui peuvent aussi, avec

les précautions convenables, donner des résultats analogues à ceux que l'on obtient si aisément du cuivre. Cependant, celui-ci est, pour la galvanoplastique, le métal par excellence; presque tous les autres sont plus difficiles à traiter, excepté l'or et l'argent, et il y en a même que l'on n'est pas parvenu encore à obtenir en masses cohérentes et malléables d'une épaisseur régulière : le fer est de ce nombre.

Dépôt des métaux en couches minces, dorure, argenture, etc.

316. Nous ne pouvons pas entrer ici dans tous les détails techniques relatifs à l'art du doreur, de l'argenteur, etc.; nous avons simplement pout but d'indiquer rapidement les principes sur lesquels repose la révivification des métaux précieux, et leur application en couches minces sur d'autres métaux.

Dorure au trempé ou par le procédé Elkington. — M. Elkington a imaginé, depuis peu, le procédé suivant pour dorer le cuivre et le laiton : les pièces ayant reçu le *dérochage* et le *décapage*, on les suspend à des fils métalliques, et on les plonge dans un bain bouillant dont la composition est ainsi décrite dans le brevet de M. Elkington. — On fait un mélange de 435 grammes d'eau, autant d'acide azotique, densité 1,45; et autant d'acide chlorhydrique, densité 1,15; et l'on y fait dissoudre 155 grammes d'or. Quand la dissolution est faite, on chauffe pour la rendre limpide; on la décante et on la verse dans un vase de fer; alors on ajoute 18 litres d'eau et 9 kilogrammes de carbonate de potasse, et l'on fait bouillir pendant deux heures. Il paraît que par cette ébullition le bichlorure d'or se transforme en protochlorure.

C'est dans la dissolution ainsi préparée et bouillante qu'il faut plonger les pièces, en les agitant doucement jusqu'à ce qu'elles soient convenablement dorées, ce qui n'exige que quelques instants; on les lave ensuite à grande eau, et immédiatement on les sèche à la sciure de bois chaude.

Dans cette opération, le chlorure change de base, il passe sur le cuivre pour former du chlorure de cuivre qui se dissout, tandis que l'or libre s'attache à la surface du cuivre dont il prend la place. Le dépôt est adhérent, et il n'est pas à craindre, à ce qu'il paraît, qu'il prenne une épaisseur trop grande. Il résulte des expériences de d'Arcet, que le poids d'or déposé par décimètre carré de surface varie de 30 à 40 *milligrammes;* sur la

même étendue, la dorure au mercure varie de 50 à 250 milligrammes.

Dorure galvanique. — C'est à M. de La Rive que l'on doit d'avoir, dans ces derniers temps, rappelé l'attention des physiciens et des chimistes sur les avantages que l'on pouvait tirer des courants électriques pour l'art de la dorure. Les indications qu'il avait données ont été successivement modifiées et perfectionnées : il y a, à cet égard, un conflit de priorité entre les brevets de MM. Elkington, de Ruolz et Boquillon, sur plusieurs conditions qui paraissent indispensables au succès des expériences. Sans entrer ici dans aucune discussion des titres que les inventeurs divers peuvent avoir à des exploitations industrielles privilégiées, je vais indiquer en peu de mots le procédé tel qu'il est employé en ce moment dans quelques ateliers. On mélange des dissolutions de chlorure d'or et de cyanure de potassium, dans des proportions qui ne sont point restreintes entre des limites très-étroites; ce mélange peut être plus ou moins concentré et plus ou moins chaud; contre la paroi intérieure du vase qui le contient, on suspend une lame d'or qui fait fonction d'électrode soluble, et l'on procède comme pour la dorure au trempé, avec cette seule différence qu'ici les fils qui portent les pièces sont mis en rapport avec le pôle négatif d'une pile, tandis que le pôle positif communique par divers points à la lame d'or dont nous venons de parler. Dans cette opération, comme dans celles que nous avons décrites pour le cuivre, l'intensité du courant doit être réglée d'après diverses conditions relatives à la température du bain, à son degré de concentration en or et même en potassium, et surtout à l'étendue des pièces soumises simultanément à son action.

Ce procédé s'applique non-seulement au cuivre et au laiton, mais à l'argent, au maillechort, au fer, à l'acier; cependant les conditions d'adhérence ne sont pas les mêmes pour les différents métaux : il paraît que sur les premiers on arrive à les remplir d'une manière assez satisfaisante; mais il est encore à craindre que les dorures du fer et de l'acier ne laissent à cet égard beaucoup à désirer.

L'argenture se fait identiquement de la même manière, en employant un bain de cyanure double d'argent et de potassium.

Le cobaltage et le nickelage s'obtiennent de même par les cyanures doubles de ces métaux.

M. Becquerel a présenté récemment à l'Académie des sciences (*Comptes rendus*, mars 1844, p. 449) des échantillons remarquables de métaux recouverts de couches minces de platine, de cobalt, de nickel, de palladium, d'iridium, etc. La méthode qu'il a suivie pour les obtenir est analogue à celle de la dorure au trempé, dont nous avons parlé plus haut; elle consiste à préparer une solution de double chlorure métallique et alcalin, et à l'employer à une température comprise entre 0 et 100°. Les pièces convenablement décapées sont plongées et légèrement agitées dans le bain, puis après quelques instants, une minute à peu près, elles sont retirées, lavées à grande eau et séchées à la sciure chaude.

Nous indiquerons, comme exemple, la préparation du chlorure double de platine. « On prend une dissolution de platine aussi neutre que possible, on verse dedans une solution concentrée de potasse pour opérer sa décomposition. On lave le précipité, d'abord avec un mélange d'alcool et d'eau, puis avec de l'alcool ordinaire pour enlever l'excédant d'alcali sans dissoudre le double chlorure, ou du moins le mélange de double chlorure et de platinate de potasse. On a alors celui-ci parfaitement neutre, puisque sa solution dans l'eau distillée ne change pas la couleur de papier de tournesol rougi par un acide. Cette solution, étendue de deux ou trois fois son volume d'eau, sert à obtenir le *platiné*, en opérant à 60 ou 70° au plus. »

Dépôt des oxydes et coloration des métaux par l'oxyde de plomb.

317. Priestley paraît être le premier qui se soit occupé de la coloration des métaux par l'électricité; il rapporte dans ses ouvrages un grand nombre d'expériences sur ce sujet. Son procédé consiste a faire passer des décharges électriques au travers de lames polies de métal, deux pointes opposées et rapprochées de la lame dirigeant le courant, à peu près comme dans l'expérience du perce-verre. Il paraît que le métal des pointes est détaché par la décharge, et vient former sur la lame des anneaux concentriques de diverses nuances, qui dépendent de l'épaisseur de la matière étrangère qui est ainsi étalée et comme incorporée à celle qui constitue la lame elle-même.

Nobili était parvenu aussi à colorer les métaux, mais par un

procédé qui n'a aucun rapport avec le précédent. Nobili employait des dissolutions métalliques, ou même des dissolutions de sucs végétaux ; la lame de métal sur laquelle il voulait faire naître des couleurs était plongée dans la dissolution et mise en communication avec l'un des pôles de la pile, tandis que l'autre pôle, composé d'une pointe ou d'un fil assez fin, était présenté à une petite distance de la lame ; une pile plus ou moins forte donnait un courant, la dissolution était décomposée, et la lame se couvrait rapidement d'une série d'anneaux diversement colorés, dont la pointe formait le centre ; à côté de cette série on en faisait naître une autre en déplaçant la pointe, et la surface entière de la lame se trouvait bientôt couverte de couleurs dont on pouvait diversifier à l'infini les nuances et l'arrangement. Les dissolutions des sels de plomb donnaient surtout des couleurs vives et brillantes. Mais en général, la coloration était plus vive quand la lame formait le pôle positif. Il paraît que, dans ce mode d'expérience, les métaux oxydables forment des couches d'oxydes plus ou moins épaisses, et que les métaux non oxydables se couvrent de divers produits oxygénés des dissolutions.

M. Becquerel, conduit récemment à des recherches analogues, est parvenu, par des méthodes nouvelles, à des résultats qui ont peut-être quelques rapports avec ceux de Nobili, mais qui paraissent destinés à recevoir des applications plus étendues et plus importantes. (*Comptes rendus*, 1843, 2e sem., p. 1 et 53 ; et 1844, 1er sem., p. 197.)

Les expériences de M. Becquerel portent sur trois points que nous allons successivement examiner : 1° dépôt d'oxyde de plomb sur les métaux pour leur donner des colorations variées ; 2° dépôt d'oxyde de plomb en couches plus épaisses, sur les métaux oxydables, pour les rendre inaltérables à l'air ; 3° dépôt de peroxyde de fer pour obtenir le même résultat.

Coloration par l'oxyde de plomb.—On fait bouillir avec de la litharge une dissolution de potasse caustique, de manière qu'elle se sature de protoxyde de plomb ; cette dissolution doit être employée à la température ambiante de 12 ou 15°, et marquant à l'aréomètre de Baumé 24 ou 25°. Lorsque après avoir servi à un certain nombre d'expériences elle cesse d'être saturée, on la remonte au point de saturation en la faisant de nouveau bouillir avec de la litharge ; et comme en même temps une

partie de la potasse a absorbé l'acide carbonique de l'air, on ajoute un peu de chaux, et l'on filtre pour la débarrasser du carbonate de chaux qui s'est précipité.

Cette dissolution se verse dans un très-large bocal de verre, on y plonge l'objet qui doit être soumis à la coloration, et qui a dû recevoir un décapage convenable; puis l'on fait passer le courant de la manière suivante : l'objet est toujours mis en rapport avec le pôle positif de la pile, et le pôle négatif lui est présenté à des distances diverses et changeantes, suivant les effets que l'on veut obtenir. Souvent il est nécessaire de faire communiquer l'objet au pôle positif, non pas par un seul fil, mais par plusieurs, ayant des points d'attache symétriquement choisis d'après sa forme; quant au pôle négatif, il faut aussi le multiplier par la même raison. M. Becquerel a reconnu que des fils de platine d'un dixième de millimètre de diamètre, scellés dans des tubes de verre, et coupés ras au sortir du tube, forment les meilleurs électrodes négatifs : c'est par cette section si petite que le courant passe dans la dissolution; et lorsqu'on prend un nombre suffisant de ces tubes et qu'on les manœuvre habilement, on parvient en quelque sorte à peindre sur les divers points de l'objet toutes les nuances dont on a voulu les orner.

L'opération marche rapidement; elle dure à peine une ou deux minutes, et quelquefois seulement trente ou quarante secondes.

La pile que M. Becquerel préfère pour ses expériences se compose de 6 paires zinc et cuivre, plongées dans de l'eau acidulée avec un centième d'acide sulfurique. Le zinc est un cylindre plein et amalgamé de 10 centimètres de hauteur sur 2 ou 3 centimètres de diamètre; le cuivre est une lame de même hauteur, repliée cylindriquement autour du zinc, à la hauteur de 3 ou 4 centimètres.

Les expériences ne peuvent réussir que sur des objets dont les surfaces sont parfaitement métalliques et exemptes de toute souillure étrangère. Pour les métaux non oxydables, comme l'or et le platine, ou le cuivre doré, etc., il suffit en général de les passer à la brosse avec une eau alcaline; quelquefois il est nécessaire de mettre sur la brosse un peu de rouge d'Angleterre; on les lave à grande eau pour les soumettre immédiatement à l'opération, en se gardant de les toucher avec les doigts.

Pour le cuivre et le laiton, il faut d'abord faire un *dérochage*;

c'est-à-dire chauffer les pièces au petit rouge, et les plonger dans l'acide sulfurique étendu, marquant 12° de Baumé, et chauffé à 60 ou 80°; ensuite on fait un *décapage*, en les passant successivement dans deux autres bains, le premier d'acide azotique, le second d'un mélange de 3 parties d'acide azotique, et 1 partie d'acide sulfurique, avec addition de sel marin; au sortir de celui-ci, on lave les pièces à grande eau, pour les porter de suite dans le bain de coloration.

Le fer et l'acier très-poli se traitent comme l'or et le platine; le maillechort se brosse seulement avec de la ponce très-fine; l'argent, à moins qu'il ne soit très-poli, ne prend pas de belles couleurs, il s'oxyde trop facilement.

Aussitôt que, par les mouvements habilemeut combinés des électrodes négatifs, on est parvenu à donner aux pièces les couleurs voulues, on les retire du bain colorant, pour les laver de suite et les sécher.

Dans cet état, elles ne pourraient pas cependant conserver longtemps leur éclat : M. Becquerel y remédie en les couvrant au pinceau d'un vernis préparé de la manière suivante : Dans un pot vernissé on met un demi-litre d'huile de lin, de 4 à 8 grammes de litharge fine, 2 grammes de sulfate de zinc, et l'on chauffe à une chaleur modérée pendant plusieurs heures. On filtre pour séparer l'excès de litharge, et si l'huile est trop épaisse, l'on ajoute un peu d'essence de térébenthine, préalablement bouillie sur la litharge.

Lorsqu'une pièce est manquée, il suffit de la passer dans l'acide acétique pour enlever la couche d'oxyde de plomb déposée, après quoi on la prépare pour une nouvelle opération.

M. Becquerel explique ces phénomènes dans plusieurs passages de ses Mémoires, et il me semble que sa théorie peut se résumer de la manière suivante : Dans les circonstances où l'on opère, l'oxyde de plomb et la potasse forment un plombate de potasse qui se décompose comme un sel ordinaire, l'oxyde de plomb se rendant au pôle positif et la potasse au pôle négatif; en même temps l'eau est aussi décomposée; l'oxygène de l'eau suroxyde le plomb, et c'est le peroxyde qui en résulte qui se fixe sur le métal du pôle positif avec une complète adhérence. En couche aussi mince ce peroxyde est transparent : d'une part, il laisse voir par transmission la couleur propre du métal qu'il couvre; d'autre part, il agit comme lame mince, et fait voir les

belles couleurs des bulles de savon. En même temps l'hydrogène du pôle négatif est tantôt dégagé au moins en partie, tantôt employé à réduire l'oxyde de plomb pour former sur ce pôle des lamelles de plomb métallique.

Quelquefois, au pôle positif, au lieu de la couche colorante, on obtient un dépôt jaune non adhérent, que M. Becquerel regarde comme du peroxyde hydraté, contenant un atome d'eau.

Il paraîtrait donc que l'on n'obtient les vives couleurs dont il s'agit que sous des conditions nombreuses et assez difficiles à réaliser : il faut d'abord qu'il n'y ait aucun dégagement d'oxygène au pôle positif, c'est-à-dire que l'oxygène qui résulte de la décomposition de l'eau soit juste ce qu'il faut pour suroxyder l'oxyde qui résulte de la décomposition du sel de plomb, ou qu'il y ait exactement un atome d'eau et un atome de sel décomposés; il faut ensuite que le peroxyde de plomb formé ne passe pas à l'état d'hydrate.

Lorsque M. Becquerel veut déposer une couche épaisse d'oxyde sur les métaux oxydables pour les rendre inaltérables, il se sert encore de la dissolution précédente, mais il procède autrement. Cette dissolution est versée dans un large bocal de verre, au milieu duquel est un vase de porcelaine dégourdie et poreuse rempli d'un mélange d'eau et d'un vingtième d'acide azotique. Le pôle positif d'un élément ordinaire communique avec la pièce à couvrir qui se plonge dans la dissolution de plomb et de potasse; le pôle négatif, qui est un fil de platine, plonge dans la dissolution azotique, et en peu d'instants la pièce est partout recouverte d'une couche brune d'oxyde qui est très-adhérente et supporte même l'action du brunissoir.

Les dépôts de peroxyde de fer se font d'une manière analogue, seulement le protoxyde de fer est dissous dans l'ammoniaque; pour cela, on précipite par l'ammoniaque une dissolution de protosulfate de fer privée d'air, et l'on ajoute assez d'ammoniaque pour redissoudre le protoxyde précipité : c'est cette dissolution ammoniacale qui remplace la dissolution de potasse de l'expérience précédente. Du reste, on procède de la même manière. Cependant l'on ne pourrait pas traiter par cette méthode tous les métaux oxydables : M. Becquerel n'a pas réussi avec le cuivre ni avec le cuivre doré ou argenté, mais il a réussi d'une manière satisfaisante avec le fer et l'acier. La couche de

peroxyde de fer déposée a pu très-bien supporter l'action du brunissoir.

Ces essais sont intéressants, ils permettent d'espérer que l'on pourra peut-être un jour appliquer utilement les procédés galvaniques pour revêtir les métaux d'oxydes métalliques très-adhérents et à peu près inaltérables.

CHAPITRE VIII.

Phénomènes d'induction.

318. Appareil d'induction produisant tous les effets de la pile. — Nous avons fait connaître (**270**) la proposition fondamentale relative à l'origine des courants d'induction, nous allons maintenant indiquer les conséquences directes qui se déduisent de cette proposition ; et nous essayerons ensuite de résumer en peu de mots les principaux faits qui ont été ajoutés à ces premières recherches.

On comprend d'abord combien il est facile, bien que les courants soient instantanés par leur nature, de les rendre en quelque sorte continus pour mieux observer tous les phénomènes qu'ils sont capables de produire. En effet, *a* et *b* (Pl. 21, Fig. 15) représentant le pôle austral et le pôle boréal d'un aimant ordinaire, supposons qu'au-dessus de cet aimant se trouve un électro-aimant dont, pour plus de simplicité, nous ne représenterons que les extrémités inférieures *m* et *n*, ainsi que l'axe vertical *c* autour duquel il peut tourner, et examinons, par exemple, les phénomènes qui vont se produire dans la branche *m* pendant qu'elle décrit une circonférence entière en partant de la position *m'* et en passant successivement en *m*, *n'* et *n* : de *m'* en *m* le fluide boréal du fer doux de cette branche est attiré, le fluide austral repoussé, et il en résulte dans le fil un courant inverse du courant du pôle austral *a* ; de *m* en *n'*, les deux fluides tendant à se recomposer, le courant devient direct ; de *n'* en *n* le fluide austral est attiré, le courant est inverse de *b*, et par conséquent le même qu'en *n'* ; de *n* en *m'* le fluide austral tend à se recomposer, le courant est direct avec *b* et inverse de *a* ; d'où il suit enfin que dans toute la demi-circonférence comprise entre *m* et *n* en passant par *n'* le courant du fil de la branche *m* marche dans un sens, et que dans toute la demi-circonférence comprise entre *m* et *n* en passant par *m'* il marche en sens inverse. Ce que nous venons de dire de la branche *m* s'applique à la branche *n*. Donc, pour avoir un courant continu ou à peu près, il suffit d'imprimer à l'électro-aimant un mouvement de

rotation rapide, et de recueillir seulement le courant qui se produit pendant le passage de l'une de ses branches par l'une des demi-circonférences comprises entre *m* et *n*; ou bien encore de recueillir le courant qui se produit dans les deux demi-circonférences, mais d'en changer la direction au moyen d'un commutateur pour le faire arriver dans les corps où l'on veut le faire agir.

Ces principes ont été réalisés d'abord par Pixii fils, dans un grand appareil qu'il nous a fait pour la Faculté des sciences; mais, depuis, d'autres constructeurs ont établi des appareils plus portatifs, et nous allons décrire ici celui de M. Clarke, qui a l'avantage de produire de grands effets, quoique très-réduit dans ses dimensions.

L'appareil de Clarke est représenté dans les figures 16 et 17, il se compose principalement d'un aimant fixe en fer à cheval dont on ne voit qu'une moitié *ac* dans la coupe de la figure 16; devant cet aimant tourne l'électro-aimant *mn*, dont une branche est vue en élévation et l'autre en coupe; ses bobines sont faites seulement avec 40 mètres d'un fil de cuivre ayant au moins 1 millimètre d'épaisseur. Cet électro-aimant se visse sur l'axe de rotation, qui est lui-même mis en mouvement au moyen de la grande roue *d* et de la petite poulie *f* sur laquelle passe la corde *g*.

L'une des extrémités du fil qui forme la bobine communique avec l'axe *h*, et l'autre extrémité avec l'espèce de virole *i* qui est isolée de l'axe : ainsi, l'axe *h* et la virole *i* sont les deux pôles de cette nouvelle pile. Dans le support *k*, représenté en perspective (Fig. 17), se trouvent deux petites caisses en cuivre *r* et *s*, remplies de mercure : lorsque ces caisses communiquent au moyen du fil *t*, et qu'en même temps le petit ressort *x* apporte à la caisse *r* l'électricité de la virole *i*, il est évident que les deux pôles de la pile se trouvent l'un sur l'axe *h* et l'autre à l'extrémité du fil *y*, Alors, en montant sur l'axe la petite pièce excentrique *z*, représentée au-dessous de *k*, le contact cesse lorsque ses deux arêtes échappent au fil *y*, et l'on voit briller une très-vive étincelle à chaque demi-révolution; pour obtenir le maximun d'effet, le contact doit cesser à peu près quand l'électro-aimant est vertical.

On peut de même adapter à l'appareil une petite pièce (Fig. 18) portant un fil de platine très-fin et très-court, qui rougit sensiblement par le passage du courant.

On peut aussi adapter à l'extrémité de l'axe une pièce à deux pointes (Fig. 19) qui donne de très-belles étincelles lorsque ces pointes, pendant leurs révolutions, touchent du mercure contenu dans un vase de métal *v* communiquant à l'autre pôle de l'appareil ; on peut enfin de la même manière allumer de l'éther très-facilement.

Pour obtenir des effets chimiques et physiologiques, il faut à l'électro-aimant précédent en substituer un autre dont les bobines soient faites avec un fil très-fin de 1500 mètres de longueur. Alors, à la pièce excentrique *z* on substitue aussi sur l'axe la pièce *u* (Fig. 20), qui n'établit la communication entre les pôles que pendant une demi-circonférence; par ce moyen l'hydrogène et l'oxygène se trouvent séparés.

Enfin, en prenant de chaque main les cylindres à commotion (Fig. 21), après les avoir mis en contact avec les deux pôles de l'appareil au moyen de fils plus ou moins longs, on reçoit des commotions qui deviennent insupportables quand le mouvement de rotation est assez rapide.

319. Magnétisme de rotation ou phénomènes magnétiques qui semblent se développer dans les corps conducteurs lorsqu'ils se meuvent sous l'influence des aimants. — C'est à M. Arago que nous devons la découverte de ces phénomènes, dont M. Faraday donne une explication très-heureuse en les considérant comme des phénomènes d'induction. Nous rapporterons d'abord les principales observations de M. Arago, et nous essayerons d'indiquer ensuite comment M. Faraday est parvenu à les expliquer.

L'appareil que M. Arago a employé dans ses recherches est représenté dans les figures 22, 23, 24, 25 *h*. (Fig. 23) est une horloge tout en cuivre, excepté deux ou trois petits pivots qui sont en acier; elle est portée sur un bâti de bois, très-solide, qui peut être mis d'aplomb au moyen de vis calantes. Cette horloge est destinée à imprimer un mouvement de rotation très-rapide à un axe vertical *x* (Fig. 23, 24) : l'axe communique le mouvement à une pièce *u* à trois branches, qui est représentée plus en grand dans la figure 25; c'est sur cette pièce que l'on ajuste les disques qui doivent servir aux expériences; ils se centrent d'eux-mêmes au moyen d'un petit trou qui reçoit le prolongement de l'axe de rotation, et ils sont arrêtés à leur contour, sur les branches de la pièce *u*, par une petite pièce mobile que

serre une vis de pression. On peut mettre à volonté trois volants v que l'on incline plus ou moins, suivant le degré de vitesse auquel on veut s'arrêter. Reste à présent à soumettre l'aiguille à l'influence du disque tournant. Pour cela on place autour de l'horloge une table à quatre pieds pp', percée en son centre d'une ouverture un peu plus grande que les disques ; sous cette ouverture on colle une feuille de papier ii' (Fig. 23), et sur la table elle-même on pose une cloche c, dans laquelle on suspend l'aiguille gg' au moyen d'un fil de soie f. L'aiguille peut être élevée ou abaissée en tournant le treuil t dans un sens ou dans l'autre.

Le poids de plomb k (Fig. 22) met l'horloge en mouvement ; un bouton sert à l'arrêter, et un compteur indique le nombre des tours, qui peut être de 8 à 10 par seconde ; il y a même un timbre qui sonne à chaque centaine, et, par là, on peut aisément reconnaître l'instant où la vitesse de rotation est devenue à peu près uniforme.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe : tout étant en repos, et l'aiguille dirigée dans le méridien magnétique, on tourne le bouton d'arrêt, et le disque entre en mouvement ; sa vitesse de rotation est d'abord très-petite, mais elle prend une accélération rapide, et bientôt l'aiguille est déviée comme si elle tendait à suivre le disque dans ses révolutions successives. Cependant, cette force d'entraînement est balancée en partie par la force magnétique de la terre ; qui rappelle l'aiguille dans le méridien ; de telle sorte que le rapport de ces forces détermine la position d'équilibre. La force entraînante du disque croît avec sa vitesse de rotation : par conséquent, pour une faible vitesse, l'aiguille s'arrête, par exemple, à 10° de déviation ; pour une vitesse plus grande, à 20° ; et l'on peut ainsi, en modifiant les vitesses et en les soutenant uniformes, arrêter l'aiguille dans toutes les positions obliques à l'égard du méridien, depuis 0 jusqu'à 90°. Mais, dès que la vitesse est assez grande pour entraîner l'aiguille au delà de cette déviation de 90°, il n'y a plus de point de repos : l'aiguille tourne avec le disque, et tend à prendre elle-même toute la vitesse de rotation dont il est animé. Telle est la force magnétique toujours croissante que prennent les corps en mouvement. Voici maintenant ce qu'on observe à son égard.

Cette force décroît à mesure que la distance augmente ; car

l'aiguille, qui tourne d'un mouvement *continu* lorsqu'elle n'est séparée du disque que par l'épaisseur de la feuille de papier qui ferme la cloche, n'éprouve plus, lorsqu'on la soulève graduellement, que des *déviations déterminées*, diminuant toujours à mesure que la distance devient plus grande. Il est bien entendu que la vitesse de rotation du disque reste la même dans toutes ces épreuves comparatives.

Cette même force donne naissance à trois composantes :

La première est *perpendiculaire aux rayons du disque*, c'est celle que nous venons d'observer.

La deuxième est *perpendiculaire au plan du disque :* on en constate l'existence au moyen d'une aiguille verticale suspendue à l'un des fléaux d'une balance ; cette aiguille est toujours repoussée, quel que soit celui de ses pôles qui se trouve au-dessus du disque tournant, et près de ses bords.

La troisième agit *dans le sens des rayons du disque*, et on en reconnaît les effets de la manière suivante : on dispose une aiguille d'inclinaison de manière qu'elle soit verticale et que son plan de mobilité passe par le centre du disque; alors, en la déplaçant sur un même rayon, la pointe de l'aiguille peut correspondre à tous les points de ce rayon ou de son prolongement. Or, quand la pointe de l'aiguille tombe au dehors du disque, elle est repoussée loin du centre de rotation; cette force répulsive diminue à mesure qu'on avance l'aiguille vers le centre; elle est nulle à une certaine distance de ce point, et se change ensuite en force attractive pour redevenir nulle au centre lui-même.

Ainsi, sur chaque rayon du disque, il y a un point, entre la circonférence et le centre, où la force dont il s'agit est nulle; au delà elle est répulsive, et plus près du centre elle est attractive. C'est ce qui est indiqué dans la figure 24, où les lignes ponctuées marquent les directions primitives de l'aiguille.

MM. Herschell et Babbage, dans un très-beau travail sur ce sujet, établissent l'ordre suivant pour l'action de différents métaux. Celle de cuivre est prise pour unité.

Cuivre	1,00	Zinc	0,93
Étain	0,46	Antimoine	0,09
Plomb	0,25	Bismuth	0,02

L'argent paraît doué d'une grande force, l'or d'une

très-faible ; le mercure se place entre l'antimoine et le bismuth ; l'or était sans doute un alliage peu conducteur (275).

Lorsqu'un disque offre des solutions de continuité ou des fentes dans le sens de ses rayons, il perd une grande partie de sa force, et l'on doit aussi à MM. Herschell et Babbage cette remarque curieuse, qu'en ressoudant les bords avec un métal quelconque, même avec du bismuth, quand le disque est de cuivre, on lui rend presque la totalité de la force qu'il avait perdue. Mais, en remplissant seulement ces intervalles avec des poudres métalliques bien pressées, ou avec des liquides tels que l'eau ou l'acide sulfurique, on ne parvient pas à réparer sensiblement ses pertes d'intensité.

Enfin, MM. Herschell et Babbage ont encore constaté les deux faits suivants : 1° que les écrans de substances non magnétiques (c'est-à-dire non magnétiques à la manière du fer ou de l'acier) n'exercent aucune influence lorsqu'on les place entre l'aiguille aimantée et les disques tournants ; 2° qu'un disque en mouvement n'a aucune puissance pour entraîner un disque en repos : ce qui prouve que ce n'est pas le mouvement lui-même qui décompose les fluides magnétiques, et qu'il n'agit que pour agrandir les effets des fluides préalablement décomposés.

M. Barlow a constaté que le fer en mouvement agit à la manière des autres métaux, mais avec beaucoup plus d'énergie.

Voici maintenant les principes d'après lesquels ces phénomènes et tous les autres analogues paraissent s'expliquer de la manière la plus satisfaisante.

Lorsqu'au lieu d'une aiguille mobile on suspend au-dessus du disque tournant un aimant fixe et assez énergique, on reconnaît bientôt que le disque est traversé par des courants électriques dont la direction est très-remarquable. M. Faraday en avait fait d'abord une analyse générale ; Nobili et Antinori en ont fait ensuite une étude plus détaillée. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. L, p. 280.) Pour plus de simplicité, nous ne considérerons qu'un seul pôle (Fig. 26) : la flèche *f* indiquant le sens de rotation du disque, on observe aisément, avec les deux extrémités du fil du galvanomètre, qu'il y de chaque côté des courants dont le sens est indiqué par la direction des flèches. On voit donc que les parties du disque qui arrivent sous le pôle prennent des courants opposés à ceux qui constituent l'aimant au point le plus voisin, et qu'au contraire les parties du disque qui viennent de passer sous

le pôle et qui s'en éloignent prennent des courants marchant dans le même sens que ceux de l'aimant, dans les points qui sont les moins éloignés d'elles, conformément à la proposition générale (**270**).

On comprend alors que les attractions et les répulsions qui s'établissent entre ces courants d'induction et les courants constitutifs des aimants, qui sont ici les courants inducteurs, doivent nécessairement donner naissance à des forces capables de mouvoir des aimants, quand les aimants sont mobiles. Il restait toutefois à faire l'analyse complète de la disposition de ces courants, dans le cas du moins d'un disque homogène animé de vitesses variables, et soumis à l'influence symétrique de deux pôles magnétiques plus ou moins puissants. Cette question a été résolue par M. Matteucci ; je regrette de ne pouvoir entrer ici dans le détail des expériences ingénieuses et délicates qu'il a faites sur ce sujet ; on en trouvera un résumé succinct dans les *Annales de Chimie et de Physique* (t. XXXIX, p. 129, année 1823) et un exposé complet dans son remarquable ouvrage publié en 1854 (*Cours spécial sur l'induction*, etc.).

Le magnétisme terrestre ne peut manquer d'exercer sur les disques tournants une action analogue à celle des aimants ; plusieurs observateurs ont, en effet, constaté l'existence des courants qu'il développe, lorsque la rotation des disques a lieu dans des plans plus ou moins inclinés au méridien magnétique ; mais ces phénomènes n'ont pas encore été variés et discutés avec l'attention qu'ils méritent. Il en résulte cependant cette conséquence générale, c'est qu'il est presque impossible de faire mouvoir un corps conducteur sans y développer des courants d'induction plus au moins intenses, soit par l'influence des aimants ou des substances magnétiques qui avoisinent le corps, soit par l'influence du magnétime terrestre qui fait partout sentir son action.

320. Des courants d'induction de divers ordres. — Nous venons de voir que les courants d'induction produits par la rotation des aimants sont capables de produire tous les effets qu'on obtient des courants voltaïques ordinaires, savoir : effets physiques, effets chimiques, effets physiologiques ; cependant, il serait prématuré de supposer que ces effets sont essentiellement liés entre eux par les mêmes rapports ; car les courants d'induction prennent quelquefois des analogies très-remarquables avec les cou-

rants des machines, et jusqu'à présent ceux-ci ne peuvent pas être comparés aux premiers : nous les voyons, par exemple, produire des commotions redoutables, tandis que leurs effets chimiques sont presque nuls. Pour comparer les intensités des courants d'induction instantanés qui ne peuvent pas être reproduits et soutenus longtemps, comme dans l'appareil de Clarke, on est donc conduit à choisir de préférence leurs effets qui semblent les plus instantanés, savoir : la commotion, l'aimantation et l'action qu'ils peuvent exercer sur le galvanomètre. M. Henry, qui a fait les recherches les plus intéressantes sur les phénomènes d'induction (*Transactions of the American philosophical Society*, années 1835 et suivantes), a employé comme épreuve d'aimantation, une *spirale magnétisante :* c'est une spire de 30 tours serrés, qu'il introduit dans le courant d'induction, et dans laquelle il place une aiguille à coudre, dont il observe ensuite l'intensité magnétique; M. Abria, qui a fait aussi sur ce sujet des travaux remarquables, a employé un procédé analogue. Ce moyen de comparaison ne peut pas sans doute donner des rapports d'intensité parfaitement rigoureux, mais il conduit du moins à des approximations qu'il faut bien accepter, en attendant que l'on découvre une méthode plus sûre.

Supposons maintenant que l'on dispose une expérience telle qu'elle est représentée (Pl. 25, Fig. 12), d'après l'un des mémoires de M. Henry. (*Ann. de Chim.*, 1841, t. III, p. 394.) *a* étant un ruban de cuivre recouvert de soie, de 30 mètres de longueur, sur 40 millimètres de largeur, et roulé en spire; *b*, *c*, *f*, des spires semblables, ayant seulement 20 mètres de longueur; *d* et *e* des bobines de fil de cuivre d'un demi-millimètre, aussi recouvert de soie, le fil de la première ayant 1500 mètres de longueur, celui de la seconde 100 mètres; *g* est la *spirale magnétisante* qui est ici dans le dernier circuit, dans celui de la spire *f*. Admettons qu'il y ait des spirales semblables dans les autres circuits. Alors, si l'on fait passer le courant d'une pile dans la spire *a* (nous appellerons ce courant, *courant du premier ordre*), on constate que, par ses intermittences, il fait naître un *courant du deuxième ordre* dans les spires *b* et *c*, un courant du troisième ordre dans les bobines *d* et *e*, en enfin, un courant du quatrième ordre dans la spire *f*; on pourrait même aller plus loin.

Quand les courants d'induction sont produits par la rupture

du courant de la pile, dont la direction est représentée par +, on trouve, comme cela doit être, que celui du deuxième ordre est +, mais celui du troisième ordre —; celui du quatrième ordre +; celui du cinquième ordre —; et ainsi de suite alternativement. Ces successions se démontrent par le sens de l'aimantation de la spirale magnétisante, ou par les indications d'un galvanomètre que l'on interpose dans le circuit.

On observe les mêmes inversions, mais à partir du deuxième ordre, lorsque les courants d'induction sont produits, non plus par la *rupture*, mais par la *fermeture* du circuit primitif.

Ce résultat est remarquable : il fait connaître qu'un courant d'induction peut lui-même donner naissance à un autre courant d'induction; ce qui semble d'abord assez surprenant; car son existence est si courte qu'il ne fait que paraître et disparaître; au moment où il prend naissance il doit, suivant la loi commune, produire un courant inverse; mais au moment où il finit, il doit produire un courant direct : or son commencement et sa fin sont si rapprochés, que ces deux actions contraires semblent devoir être égales et se détruire l'une l'autre. On comprend que dans le circuit du deuxième ordre l'aiguille s'aimante, parce qu'elle se trouve là soumise à un courant instantané comme celui de la bouteille de Leyde, et toutes les expériences indiquent qu'il suffit d'un moment indivisible pour déterminer l'aimantation; mais il était nécessaire de faire voir que ce courant éphémère agit lui-même par induction, pour produire un courant du troisième ordre. Ce premier point établi, le sens de l'aimantation conduit à une autre conséquence : puisque le courant du deuxième ordre agit, il est présumable qu'il agit successivement comme courant qui commence et comme courant qui finit, c'est-à-dire qu'il produit un courant inverse et un courant direct; or, si ces deux courants étaient égaux, l'aiguille de la spirale magnétisante, aimantée d'abord dans un sens, puis dans un sens inverse, par une action égale et contraire, paraîtrait devoir retomber à l'état naturel; puisqu'il n'en est rien, et puisque son magnétisme est celui du courant inverse, elle semble indiquer que le courant inverse a plus d'intensité que le courant direct, ou plutôt qu'en s'éteignant et en naissant il ne passe pas par les mêmes périodes. L'inversion alternative qui s'observe dans les ordres suivants, prouve que dans tous les circuits les phénomènes s'accomplissent suivant des lois analogues.

M. Verdet a démontré d'une manière ingénieuse et décisive l'existence de ces deux courants successifs, dans un circuit induit du troisième ordre. Il s'est servi de deux bobines à deux fils, contenant chacune un cylindre de fer doux ; le premier fil de la première bobine recevait le courant d'une pile, dont le circuit était ouvert et fermé, un grand nombre de fois dans 1′, au moyen d'une roue pareille à celle de la figure 26 (Pl. 22); le deuxième fil de cette bobine formait avec le premier fil de la deuxième un circuit fermé du deuxième ordre; enfin le deuxième fil de la deuxième bobine était mis en communication avec un voltamètre, où devait passer le courant du troisième ordre. Un commutateur était disposé de telle sorte que les courants induits, directs ou inverses eussent toujours la même direction dans la deuxième bobine. Or, dans ces expériences chaque éprouvette du voltamètre contenait les deux gaz, non pas en égale proportion, mais toujours assez mélangés pour produire un mélange détonant. (*Ann. de Chim. et de Phys.* t. XXIX, p. 501.)

321. Intensités différentes que paraissent avoir les courants d'induction, suivant qu'on les examine par la spirale magnétisante, par le galvanomètre ou par la commotion. — M. Henry a démontré par des expériences tout à fait concluantes :

1° Que le courant *inverse* qui naît par la fermeture du circuit primitif, et le courant *direct* qui naît par sa rupture, peuvent paraître égaux lorsqu'on les compare au moyen des déviations galvanométriques; tandis qu'ils sont très-différents si on les compare au moyen de la commotion, celle du second étant très-rude, et celle du premier presque imperceptible; très-différents aussi par la spire magnétisante, le premier n'aimantant pas l'aiguille, et le second l'aimantant à saturation.

2° Qu'en variant les conducteurs du courant primitif, soit en longueur, soit en épaisseur, et en augmentant convenablement le nombre des éléments de la pile, on peut rendre les courants induits, directs et inverses, sensiblement égaux entre eux, soit qu'on les compare au moyen du galvanomètre, de la commotion, ou de l'aiguille magnétisante.

3° Que le courant direct, apprécié par la commotion, augmente en général avec le nombre des éléments, sans que le courant inverse éprouve des augmentations pareilles.

322. Influence des plaques interposées entre la spire induisante et la spire induite. — Les plaques non conductrices n'exercent aucune influence sur l'intensité du courant d'induction; mais les plaques conductrices exercent une influence remarquable : par leur interposition, les commotions s'affaiblissent rapidement; l'aiguille de la spire magnétisante reçoit une aimantation beaucoup moindre; et cependant les indications galvanométriques restent sensiblement les mêmes. Ces plaques reçoivent elles-mêmes une sorte d'induction; car M. Henry ayant enlevé un secteur dans un disque de plomb, et soudé de part et d'autre, sur la circonférence, les extrémités d'une spirale magnétisante, il a constaté que l'aiguille s'aimantait, qu'ainsi la partie enlevée du disque empêchait le courant de se développer pleinement. Cette expérience explique directement l'effet des solutions de continuité, et fait voir comment les fissures un peu grandes réduisent les plaques conductrices au rôle de plaques non conductrices, dans ces expériences comme dans celles de M. Faraday.

323. Réaction que les courants d'induction exercent les uns sur les autres. — M. Abria a traité ce sujet avec habileté. (*Ann. de Phys. et de Chim.*, 1843, t. VII, p. 462.) Nous regrettons de ne pouvoir citer ici qu'un petit nombre de ses expériences.

Lorsque trois spirales planes et égales *a*, *b* et *c* (Pl. 25, Fig. 8), sont superposées et très-rapprochées, si l'on fait passer dans l'une d'entre elles un courant primitif, le courant induit qu'il détermine dans l'une des deux autres par sa rupture, n'est pas modifié par la présence de la troisième quand elle reste ouverte; elle n'agit alors que comme une plaque non conductrice. Mais il n'en est plus de même quand elle est fermée, c'est-à-dire, quand elle peut recevoir la double action du courant primitif, et du courant induit dans la seconde. Si le courant primitif passe dans *b*, le courant induit de *a* diminue quand on ferme *c*, et *vice versa;* s'il passe dans *a*, le courant de *c* est fortement réduit quand on ferme *b*, et *b* se trouve lui-même sensiblement réduit si l'on ferme *c*.

On conçoit en effet qu'il doive en être ainsi, par cela seul qu'un courant d'induction peut lui-même agir par induction, et produire des courants alternativement directs et inverses; en effet, quand *a* est le courant du premier ordre et *b* celui du deuxième, si *c* est fermé, il devient aussi du deuxième ordre par

rapport à *a*, et réagit en conséquence sur *b* pour en faire un courant du troisième ordre, comme *b* réagit sur lui pour le faire pareillement du troisième ordre, et ces actions sont contraires.

Il en est de même lorsque le courant primitif passe dans la spire du milieu *b*.

On dispose trois spirales planes au-dessus l'une de l'autre, comme dans l'expérience précédente : la première, *a*, est de 24 tours d'un fil de cuivre de $2^{mm},5$; la seconde, *b*, et la troisième, *c* (Fig. 9), sont l'une et l'autre de chacune trois fils de 160 mètres de longueur, de $0^{mm},64$ de diamètre, très-bien recouverts de soie. Le courant d'un élément voltaïque passe par la spire *a*, et les effets d'induction produits par sa *rupture* sont observés sur les spires *b* et *c*.

c étant ouvert, on observe que la commotion reste la même, soit que l'on prenne les extrémités d'un seul fil de *b*, les deux autres restant ouverts, soit que l'on prenne simultanément les trois fils ; ainsi, dans ce cas, la section n'a pas d'influence sensible. Si, au contraire, on assemble les trois fils pour n'en faire qu'un seul, la commotion devient plus vive; d'où il suit que, dans les conditions de l'expérience, l'induction estimée par la commotion augmente avec la longueur du fil.

Les secousses de *c* deviennent nulles lorsqu'on ferme *b*; celles-ci sont seulement diminuées lorsqu'on ferme *c*.

En prenant dans *c* une longueur de deux fils, c'est-à-dire deux fois 160 mètres, *b* étant ouvert, la secousse est plus vive que quand on prend un fil dans *b*, *c* étant ouvert; et cependant si l'on ferme *c*, la secousse de *b* persiste, et si l'on ferme *b*, la secousse de *c* s'éteint.

Toutefois, lorsqu'on prend dans *c* la longueur totale des trois fils, on reçoit encore une secousse lorsque *b* est fermé.

M. Abria constate par une expérience ingénieuse l'induction du courant sur lui-même : il prend une spirale *a*, *b*, *c*, (Fig. 10) d'un gros fil, dans laquelle il fait passer un courant ; ensuite, au moyen d'un fil assez fin, dont une partie *h* est tournée en spire, il fait une dérivation entre les points *a* et *c*; le courant dérivé est choisi assez faible pour ne pas aimanter une aiguille placée dans la spire. Les choses étant dans cet état, il rompt le courant en *m*; alors l'aiguille s'aimante, et accuse un courant de direction contraire à celle du courant dérivé qui traversait d'abord la spire.

324. Courants d'induction produits par l'électricité ordinaire. — Sur un cylindre de verre *a* de 2 décimètres de diamètre, on enroule, à l'intérieur et en spirale, un ruban d'étain de 8 ou 10 mètres de longueur (Pl. 25, Fig. 11). Les extrémités de cette spirale sortent du cylindre par des tubes de verre maintenus dans son axe, et ils communiquent à une spirale magnétisante; à l'extérieur du cylindre on enroule un ruban pareil dont les tours correspondent à ceux du premier. Lorsque la décharge d'une bouteille de Leyde *b* passe par le ruban extérieur, l'aiguille de la spirale magnétique accuse la présence d'un courant d'induction dans le ruban intérieur; ce courant induit est dirigé dans le *même sens* que le courant inducteur.

Un second cylindre de verre, préparé comme le premier, et mis en rapport avec lui, a fait connaître à M. Henry que le courant induit du troisième ordre est, dans ces circonstances, dirigé encore dans le même sens que celui du deuxième ordre; de même pour le quatrième ordre.

Cependant, lorsque M. Henry a étudié les courants induits des divers ordres, en faisant passer la décharge de la bouteille de Leyde dans la spire de la figure 12, il a reconnu les mêmes alternatives de direction qu'il avait observées avec le courant de la pile. Présumant alors que les directions pouvaient changer avec la distance, il a étudié, sur les rubans parallèles, les courants de la bouteille de Leyde, et constaté qu'en effet le courant induit a la même direction que le courant inducteur pour des distances plus petites que 4 ou 5 millimètres, qu'il devient nul à une distance un peu plus grande, et change de direction à une distance plus grande encore.

Lorsqu'une feuille d'étain collée sur une lame de verre présente des solutions de continuité, il arrive souvent que la décharge d'une batterie soulève et replie ses extrémités qui se regardent. M. Henry explique cet effet par l'induction du courant sur lui-même.

En s'appuyant sur les faits que nous avons rapportés, et sur d'autres encore qui sont consignés dans ses excellentes recherches, M. Henry propose une théorie, que je regrette de ne pouvoir développer ici, car elle repose sur des considérations qui, si elles ne sont pas incontestables, sont du moins très-ingénieuses.

Les expériences récentes de M. Verdet (*Ann. de Chim. et de*

Phys., t. XXIV), faites par une méthode nouvelle, jettent beaucoup de jour sur ces phénomènes si obscurs et si difficiles à saisir. M. Henrici avait démontré qu'en dirigeant la décharge d'une batterie ordinaire au travers d'un liquide conducteur, où elle arrive par des fils de platine mis en présence, ces fils se polarisent et accusent un courant inverse lorsque après la décharge on les met en communication avec un galvanomètre. Profitant de cette observation, M. Verdet a constaté que, sous certaines conditions, la décharge induite jouit de la même propriété; et il a trouvé là un moyen nouveau pour démontrer, avec plus de rigueur qu'on n'avait pu le faire, que les courants induits sont en effet composés de deux courants successifs, l'un indirect, l'autre direct; que, de plus, en variant la distance des solutions de continuité dans le circuit induit, on fait varier très-inégalement les intensités relatives ou plutôt les effets de ces deux courants successifs; on arrive ainsi à détruire en quelque sorte les effets du courant indirect, en conservant ceux du courant direct, c'est-à-dire de celui qui marche dans le même sens que le courant inducteur.

325. Induction produite par le mouvement des métaux magnétiques ou non magnétiques.—Ces phénomènes ont été, dans ces dernières années, l'objet d'un grand nombre de recherches; plusieurs physiciens avaient pensé que, dans certains cas et pour certains corps, ils devaient se rapporter au diamagnétisme dont nous parlerons dans le chapitre suivant. C'était un point qui avait une grande portée théorique; mais M. Verdet est parvenu à lever tous les doutes à cet égard; il a démontré, par des expériences décisives, que, dans tous les cas, les phénomènes dont il s'agit appartiennent à l'induction ordinaire. Nous ne pouvons pas rendre compte ici de l'ensemble de ce travail important (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXI, p. 187, ann. 1851); nous essayerons seulement de donner une idée des principaux résultats qu'il contient.

L'appareil qui sert à ces expériences est la machine de M. Page, professeur aux États-Unis.

Cette machine est représentée (Pl. 25, Fig. 21); elle se compose de deux aimants fixes, *ac*, *bd*, réunis par une armature *cd*, et présentant, en *a* et *b*, leurs pôles libres et contraires; chacun d'eux est couvert d'une bobine; un même fil, dont les deux extrémités arrivent en *v* et *v'*, est enroulé sur ces bobines dans

un sens convenable pour donner en *a* un pôle austral, et en *b* un pôle boréal, s'il était traversé par un courant. Le corps soumis à l'expérience est disposé en *pp'*; on lui donne en général la forme représentée dans les figures 19 et 20 : il est monté sur un axe qui porte un commutateur et qui reçoit un mouvement de rotation très-rapide, au moyen d'un pignon monté sur l'axe d'une grande roue dentée *gf*, que l'on tourne avec la manivelle *m*. Le commutateur se compose d'un anneau isolé, sur lequel s'appuie le ressort *r'*, et d'une bande longitudinale et parallèle à l'axe, d'une largeur plus ou moins grande qui passe sous le ressort *r* pendant un temps d'autant plus long qu'elle est plus large; pendant le temps de ce passage le fil des deux bobines se trouve en communication avec les deux extrémités *uu'* du fil d'un galvanomètre très-sensible qui doit être établi à une distance convenable. Ainsi, le galvanomètre reçoit le courant induit qui s'est développé dans les bobines; et l'on peut le recueillir de la sorte pour diverses situations de la plaque *pp'* par rapport à l'aimant, puisqu'il suffit de régler pour cela la position du commutateur par rapport à celle de la plaque.

Dans plusieurs expériences, on substitue dans l'intérieur des bobines deux solénoïdes aux deux aimants, en les ajustant pour qu'ils présentent des pôles contraires.

Si la plaque *pp'* est une plaque de fer doux, mise en rotation rapide en présence de deux solénoïdes ou de deux aimants, M. Verdet a constaté d'abord, par les déviations galvanométriques, que le courant induit des bobines ne change pas de signe à l'instant précis où ce phénomène devrait s'accomplir; il y a un certain retard mesurable qui se constate par les positions du commutateur.

Toutefois, l'effet n'est pas le même, quand la plaque se meut en présence des solénoïdes et en présence des aimants : les effets que ceux-ci éprouvent quand le fer s'approche ou s'éloigne donnent naissance à une induction plus intense dans les bobines que celle qui résulte des décompositions et des recompositions des fluides magnétiques de la plaque tournante elle-même.

Les substances peu magnétiques, comme l'oxyde de fer et le sulfure de fer en poudre, donnent des effets analogues, mais moins intenses; les poussières magnétiques étaient enfermées dans des boîtes de bois de la forme des plaques.

Pour les métaux non magnétiques, argent, cuivre, plomb, an-

timoine, bismuth, les phénomènes sont encore analogues; mais ici l'intensité des effets diminue rapidement avec la conductibilité électrique; de plus, l'influence du temps sur la résultante, c'est-à-dire sur la position de la plaque où le courant change de signe, devient aussi plus marquée, surtout à mesure que la vitesse de rotation augmente. M. Verdet explique d'une manière satisfaisante comment les courants qui devraient être tels qu'ils sont représentés (Fig. 19), lorsque l'axe de la plaque est parallèle à la ligne des pôles, se transforment comme l'indique la figure 20, et il explique pareillement, sans sortir des lois de l'induction ordinaire, tous les phénomènes que présentent le bismuth et l'antimoine, soit sous forme de plaques, soit sous forme de cylindres juxtaposés.

326. Condensateur électro-chimique de M. de La Rive. — M. de La Rive a très-ingénieusement tiré parti des courants d'induction pour composer un appareil qu'il appelle *condensateur électro-chimique* (Pl. 24, Fig. 18); voici la description qu'il en donne lui-même (*Archiv. de l'Électr.*, t. III, p. 169) :

« Le principe de cet appareil consiste à employer le courant d'un couple à force constante qui doit opérer la décomposition, à produire en même temps un courant d'induction, et à diriger ce courant d'induction à travers le couple lui-même, dans un sens tel, que son effet soit de nature à oxyder le zinc et à désoxyder le sulfate de cuivre ou l'acide nitrique. Ce courant produit ainsi sur le couple le même effet que celui que produirait le courant d'un autre couple. La disposition de l'appareil ne présente rien de compliqué. C'est un morceau de fer doux, entouré d'un gros fil de métal recouvert de soie; le courant du couple traverse ce fil et aimante le morceau de fer; aussitôt une petite tige de cuivre mobile *ab*, et munie d'un appendice de fer *f* qui est attiré par le fer aimanté, est soulevée de manière à interrompre le circuit; il se développe alors dans le fil un courant d'induction qui traverse le couple, et qui, réuni avec celui du couple lui-même, qu'il a renforcé, traverse le voltamètre qui est resté dans le circuit, et décompose l'eau. Mais le fer doux n'étant plus aimanté, la tige de cuivre retombe, le circuit métallique est de nouveau formé, le fer est de nouveau aimanté, et le même effet est produit de nouveau. Au moyen de cet appareil, un couple de Grove qui ne décompose l'eau que très-légèrement, un couple de Daniell qui ne la décompose pas sensiblement, de-

viennent capables de la décomposer avec une grande énergie. On peut obtenir jusqu'à 10 ou 15 centimètres cubes de gaz par minute. Un couple de peroxyde de plomb, qui donnait 9 centimètres cubes de gaz par minute, en donne immédiatement 18 par l'interposition de l'appareil dans le circuit. Ce couple même donne également dans ce cas une forte lumière avec les pointes de charbon.

« Dans l'appareil dont je me suis servi, il y a trois fils de cuivre de 1 millimètre de diamètre, faisant chacun 100 tours, et réunis par leurs extrémités correspondantes, de façon à représenter un seul fil de 3 millimètres de diamètre (ou plutôt d'une section triple), faisant 100 tours. »

327. Lumière électrique produite par induction. — La figure 13 (Pl. 25) représente un appareil de Ruhmkorff très-ingénieusement combiné par cet habile constructeur pour produire des courants induits extrêmement remarquables par l'éclat de leur lumière. Il se compose d'un faisceau de fils de fer de 30 ou 40 centimètres de longueur, tous bien dressés, sur lesquels on enroule d'abord un *gros fil* de cuivre d'environ 2 millimètres d'épaisseur, qui est le fil inducteur, et sur celui-ci un *fil fin* d'environ un tiers de millimètre d'épaisseur et de plus de 1000 mètres de longueur, qui est le fil induit. Les bouts de la bobine sont des disques de verre, et le faisceau de fer les dépasse de 5 ou 6 centimètres. Le courant, produit par un seul élément ordinaire, ou au plus deux, traverse un instant le gros fil pour aimanter le fer; alors le circuit se rompt, le courant induit prend naissance dans le fil fin et passe dans l'appareil destiné à le recevoir; puis l'aimantation recommence, produit une nouvelle induction, et ainsi de suite. Avec le faisceau de fils de fer et la bobine, les deux pièces importantes de l'appareil sont l'*interrupteur* et le *commutateur*.

L'interrupteur ouvre et ferme le circuit voltaïque dont le gros fil fait partie; M. Ruhmkorff a fait ici une heureuse application du principe de M. de La Rive dont nous venons de parler, en tirant de l'électro-aimant lui-même la force destinée à produire cet effet. L'une des extrémités du gros fil communique avec l'un des pôles de l'élément, l'autre vient communiquer avec la colonne de cuivre *a*, comme on le voit plus nettement en *g* dans la vue de bout (Fig. 13 *bis*); le courant ne peut arriver en *g* que par la pièce mobile *m* que l'on appelle le *marteau;* son

extrémité est de fer, et il ne peut arriver au marteau que par le cylindre de platine *k*, que l'on appelle l'*enclume*, sur lequel il repose par son poids quand il n'est pas soulevé par l'attraction magnétique du faisceau; une vis *v* permet de régler la hauteur de l'enclume et, par conséquent, la distance à laquelle on veut que le fer du marteau soit attiré. Dans l'état ordinaire, le courant passe de *k* en *m* et en *g* par la colonne *a*; mais aussitôt que l'aimantation est assez vive, elle soulève le marteau et rompt le circuit de tout l'intervalle qui s'ouvre entre le marteau et l'enclume. Après quelques instants, les fluides se sont recomposés en produisant leur action inductive, le marteau retombe, ferme le circuit, fait de nouveau passer le courant, qui produit de nouveau l'aimantation et par suite l'attraction du marteau et une nouvelle rupture; puis ces alternatives se répètent indéfiniment avec une grande régularité.

Le commutateur donne le courant, il le donne instantanément et à volonté dans un sens ou dans l'autre; c'est un commutateur de contact : M. Ruhmkorff en a exclu avec raison toute trace de mercure. Il se compose d'un gros cylindre d'ivoire *c* (Fig. 13) qui se tourne, au moyen du bouton *b*, son axe reposant sur deux supports en équerre *d* et *d'* de cuivre rouge qui sont fixés sur la table; la coupe transversale de ce cylindre est représentée (Fig. 13 *ter*). On voit que deux fortes lames de cuivre, un peu convexes, *e*, *é*, et diamétralement opposées, sont incrustées sur sa longueur; quand elles touchent les ressorts *r*, *r'*, elles reçoivent le courant; mais si au moyen du bouton *b* on fait faire au cylindre un quart de révolution, les ressorts touchent l'ivoire et le courant ne passe plus. *e* communique toujours avec l'équerre *d*, *e'* toujours avec *d'*; ainsi, en supposant que le ressort *r* reçoive le pôle positif de la pile, *d* sera positif ou négatif, suivant que par le mouvement du bouton *b* on aura mis *e* ou *é* en contact avec *r*. Il en résulte qu'en partant de la position indiquée (Fig. 13 *ter*), il suffit de tourner le bouton *b* d'un quart de révolution ou d'une demi-révolution, pour faire cesser le courant ou pour le faire passer en sens inverse. Les autres communications sont suffisamment indiquées par la figure 13.

Les deux extrémités du fil d'induction sortent par deux trous pratiqués dans le disque de verre qui termine la bobine du côté du marteau; l'une, celle de la couche intérieure, vient à la

colonne de verre h'; l'autre, celle de la couche extérieure, vient à la colonne h; et, du sommet de ces colonnes qui doivent être parfaitement isolées, on fait passer le courant d'induction dans les appareils destinés à le recevoir. La figure 13 représente l'*œuf philosophique* dans lequel se produisent des phénomènes de lumière des plus remarquables. On y raréfie l'air comme pour l'électricité ordinaire, on règle la course du marteau, on met l'appareil en communication avec un seul élément Bunsen; et alors, pendant des heures entières, on voit tout l'intérieur du globe sillonné par des flots étincelants de lumière électrique qui se renouvellent sans cesse avec une rapidité prodigieuse. La meilleure machine électrique, tournée par des hommes de relais qui s'y épuiseraient de fatigue, ne donnerait pas une lumière plus vive et plus persistante. Cet appareil seul aurait suffi pour faire un grand honneur à M. Ruhmkorff, dont la rare sagacité est bien appréciée de tous les physiciens.

Ces effets de lumière sont variés à l'infini, suivant l'intensité du courant, la distance des boules, l'élasticité du gaz qui reste et des vapeurs diverses que l'on peut y mélanger. M. Ruhmkorff avait dès l'origine signalé deux flux de lumière, très-apparents, l'un qui semble partir de la tige et de la boule positive, s'étalant en général avec des teintes de rouge plus ou moins vif, l'autre qui semble partir de la tige et de la boule négative sous l'aspect d'enveloppes successives teintées de bleu plus ou moins foncé. M. Quet, qui a des premiers essayé d'analyser ces phénomènes) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXV, p. 949, déc. 1852), a très-bien constaté un fait singulier aperçu par M. Ruhmkorff et par M. Grove : celui d'une stratification perpendiculaire à la ligne des boules, comme s'il y avait entre elles un grand nombre de couches, plus ou moins épaisses, plus ou moins courbées, et alternativement sombres et lumineuses. Les conditions de ce phénomène de stratification sont encore mal définies, elles paraissent très-variables; cependant elles se réalisent presque à coup sûr, quand après avoir mêlé à l'air des vapeurs, d'alcool, d'esprit de bois, d'essence de térébenthine, etc., on a fait le vide aussi complétement qu'il est possible avec une bonne machine, et donné au courant induit une intensité convenable. Ce sujet si complexe est devenu l'objet d'une foule d'expériences : d'habiles observateurs, à la tête desquels on peut citer M. Masson, M. le comte Th. Du Moncel

et M. Gaugain, ont signalé à cet égard diverses particularités très-curieuses.

M. Ruhmkorff a appelé mon attention sur un effet singulier qui se manifeste dans tous ses appareils, et qui prend dans les plus forts une intensité considérable : la colonne *h'* (Fig. 13), à laquelle arrive le fil intérieur, peut être touchée impunément; mais il n'en est pas de même de la colonne *h*, à laquelle arrive le fil extérieur : lorsqu'on en approche le doigt, on en tire à distance une étincelle, et l'on en reçoit une commotion. Je n'ai pas eu occasion d'étudier les circonstances de cette inégalité; il me paraît cependant qu'elle est produite par un excès d'électricité statique qui s'accumule naturellement par sa répulsion propre sur la couche extérieure du fil induit.

L'étincelle du courant d'induction se manifeste aussi dans l'air sous la pression atmosphérique, non pas, à beaucoup près, à la même distance que dans le vide, mais avec la même continuité apparente. Les grands appareils la donnent quelquefois à 10^{mm}. Alors, si l'on souffle avec un soufflet ordinaire sur ce courant de flamme, les minces filets intérieurs et très-brillants restent immuables; mais leur enveloppe diffuse, épanouie en cône, se déforme, et semble obéir à l'impulsion du vent, à peu près comme ferait une flamme produite par la combustion. Les deux fils entre lesquels passe ce courant d'étincelles peuvent aussi être portés près de la flamme d'une bougie, pour montrer la plus grande conductibilité de l'air chaud.

Tous ces phénomènes prennent encore plus d'intensité lorsqu'on introduit des condensateurs, soit dans le fil inducteur, comme l'a fait d'abord M. Fizeau, soit dans le fil induit, comme l'a fait ensuite M. Grove; mais il y a des proportions à établir entre les surfaces condensantes et l'intensité du courant.

Ainsi, au moyen de l'appareil de Ruhmkorff, un simple élément de Bunsen ou de Daniell, à peine capable de donner par lui-même des étincelles perceptibles, devient tout à coup une machine puissante, donnant incessamment des courants de flamme électrique et des commotions foudroyantes.

328. Rotation d'une masse de cuivre subitement arrêtée par les courants induits. — Nous avons représenté (Pl. 25, Fig. 1) le grand appareil de Ruhmkorff, construit avec tant de soins et d'une manière si judicieuse, pour observer les phénomènes les plus intéressants de l'électro-magnétisme. On voit

qu'il se compose de deux gros cylindres de fer doux, placés bout à bout, entourés chacun d'une puissante bobine, dont les fils sont enroulés de telle sorte que les deux pôles magnétiques opposés se trouvent en regard. Ces pôles s'éloignent à volonté dans des limites assez étendues; et des pièces de fer doux de diverses formes se vissent à l'extrémité des cylindres afin de mieux approprier ces extrémités polaires aux phénomènes que l'on veut produire. Cet appareil nous sera d'un grand secours dans le chapitre suivant; pour le moment il ne doit nous servir qu'à un petit nombre d'expériences, la première est celle qui est représentée (Fig. 2) : nous avons supprimé le corps des électro-aimants pour ne montrer que leurs extrémités polaires.

Une pile de 30 ou 40 éléments Bunsen étant mise en communication avec les conducteurs de l'appareil, il ne reste qu'à tourner le bouton *a* du commutateur (Fig. 1) (voy. le numéro précédent) pour fermer le circuit, faire passer le courant dans le fil des bobines et donner aux deux pôles qui sont en présence la puissance magnétique la plus énergique. Avant de faire ce mouvement on dispose sur la règle *rr'* (Fig. 1) un support convenable auquel est suspendu, par un gros fil de soie un peu long, le cube solide de cuivre rouge représenté (Fig. 2); on donne à ce fil de soie beaucoup de torsion, puis, la masse de cuivre abandonnée à elle-même se met à tourner avec une très-grande vitesse autour de son axe et entre les deux pôles. Alors on tourne le bouton *a* pour faire passer le courant; à l'instant même le cube s'arrête entre ces deux pôles magnétiques; il est impossible de voir sans un grand étonnement la netteté et l'instantanéité de cet arrêt; la vitesse acquise est détruite, la force de torsion qui reste au fil de soie est paralysée; la masse de cuivre est comme fixée au point où elle se trouve au moment où le courant s'établit, elle ne fait désormais aucune oscillation ni en avant ni en arrière. Tournez le bouton *a* d'un quart de révolution pour supprimer le courant, la force de torsion du fil reprend son efficacité, la rotation reparaît graduellement croissante, jusqu'à ce qu'on l'arrête de nouveau par la fermeture du circuit.

Les métaux moins bons conducteurs des fluides électriques ne jouissent pas de cette propriété au même degré; il est présumable que l'or, l'argent et le palladium présenteraient les mêmes phénomènes que le cuivre.

Il serait sans doute très-difficile d'analyser en détail la direction et l'intensité des courants induits qui s'établissent dans cette masse de cuivre en mouvement, à l'instant où les pôles deviennent magnétiques; mais il ne paraît pas doutenx que cet arrêt brusque ne soit produit par la réaction de ces courants induits sur les courants directs qui donnent aux deux pôles leur puissance.

L'expérience suivante de M. Matteucci en est la preuve : au lieu de prendre un cube solide, M. Matteucci le compose de lames très-minces de cuivre séparées l'une de l'autre par un vernis non conducteur et fortement pressées l'une sur l'autre. Quand les lames sont verticales, ou plutôt perpendiculaires à la ligne des pôles, le cube est arrêté dans son mouvement de rotation comme le cube solide : seulement, l'arrêt n'a pas lieu quand le plan des lames est parallèle à la ligne des pôles. Au contraire, quand le même cube est suspendu de manière que les lames soient horizontales ou parallèles à la ligne des pôles, il n'obéit plus à l'action magnétique, et continue son mouvement de rotation à peu près comme s'il était composé de matière non conductrice, parce que les lames sont trop minces pour que les courants d'induction puissent se développer dans leur épaisseur.

M. Foucault vient de nous communiquer sur ce sujet un fait important (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 17 septembre 1855). A l'occasion de ses recherches si curieuses sur le mouvement de rotation, M. Foucault avait fait construire, il y a quelques années, une petite machine à engrenage au moyen de laquelle il imprime aisément une vitesse de 150 tours par seconde à un tore de bronze du poids de 7 ou 800 grammes, parfaitement équilibré par un axe d'acier. Préoccupé de l'idée que les actions magnétiques ne peuvent pas arrêter les masses en mouvement sans produire un dégagement de chaleur, il a voulu le vérifier au moyen de ces rotations excessivement rapides. En conséquence, il a disposé horizontalement les deux branches d'un électro-aimant, et ajusté deux pièces polaires de telle sorte que le tore de bronze puisse un peu s'engager entre elles sans les toucher, et tourner sans autre gêne que l'influence magnétique qu'il en reçoit. Or, voici le résultat d'une expérience qui a été faite sous mes yeux : quand le courant ne passe pas, le tore accomplit librement ses 150 révolutions par seconde; à l'instant où le courant passe, on éprouve à la manivelle une résistance

considérable : la vitesse décroît rapidement, et il faut faire une grande dépense de forces à la manivelle pour maintenir une vitesse moitié moindre, ou 75 tours par seconde; cependant on soutient ainsi le mouvement pendant 3 ou 4 minutes; et quand on abandonne la manivelle, le mouvement ne tarde pas à s'éteindre. Alors la masse du tore est trop chaude pour qu'on puisse la tenir à la main ; sa température est de 45° centigrades, celle de l'appartement étant de 18°. Cet accroissement de température de 27°, dans une masse de 700 grammes, et malgré la perte énorme de chaleur qu'elle a dû faire par le contact de l'air avec sa vitesse de 75 tours par seconde, justifie amplement l'opinion de M. Foucault, qui deviendra sans doute le point de départ de recherches importantes.

329. Détonation produite par la rupture du circuit. — L'électro-aimant du grand appareil de Ruhmkorff (Pl. 25, Fig. 1) étant disposé comme dans l'expérience précédente, et le cube de cuivre rouge enlevé, on apporte entre les deux pièces polaires les deux extrémités des gros fils de cuivre, qui en se touchant établissent la fermeture du circuit et font passer le courant dans les bobines de l'électro-aimant; cette fermeture, avec une pile faible, se fait sans étincelle et sans bruit; mais, au moment où l'on sépare les deux fils pour faire la rupture, on entend une véritable détonation, presque comparable à un coup de pistolet. Ces détonations peuvent se répéter rapidement à de très-courts intervalles; elles sont d'autant plus fortes que le point de jonction et de séparation des fils est plus voisin des pièces polaires; cependant l'effet est encore sensible quand ce point de jonction en est écarté de plusieurs centimètres et même de quelques décimètres. En même temps la lumière de l'étincelle prend un grand développement, elle paraît comme une flamme allongée. Dans quelques essais que j'ai faits, à la hâte, avec M. Ruhmkorff, lorsqu'il m'a rendu témoin de cette expérience curieuse, il m'a semblé que l'air prend alors une assez grande force de projection pour lancer les poussières qui sont dans le voisinage du point de séparation des fils, pour percer et déchirer du papier.

Quelle peut être la cause d'un tel bruit? J'avoue qu'elle me paraît être en dehors de ce qui nous est connu; c'est un phénomène nouveau, qui mérite d'être étudié et expérimenté plus que les circonstances ne m'ont permis de le faire.

330. Machines électro-magnétiques. — On a fait, depuis quinze ou vingt ans, un grand nombre de tentatives pour transformer la force du courant en force motrice économique; on ne pouvait pas voir les électro-aimants s'animer tout à coup d'une puissance capable de soulever des milliers de kilogrammes sans songer à appliquer cette puissance aux besoins de l'industrie. Sur cette seule donnée les imaginations se sont mises en mouvement, et l'on a vu éclore en foule les plus gigantesques projets; il s'est trouvé partout des hommes, assez entraînés par l'ardeur de leurs spéculations, pour annoncer que la vapeur avait fait son temps et que la découverte d'OErsted allait prendre la place de celle de Papin. Ici la navigation allait prendre un nouvel essor avec des bateaux de 1000 chevaux qui ne coûteraient presque rien; là le foyer des locomotives allait être remplacé par quelques électro-aimants qui entraîneraient les convois avec une vitesse incomparablement plus grande. Toutes ces belles choses seraient sans doute accomplies si les lois toujours réglées et pondérées des phénomènes naturels pouvaient se transformer au gré de certains esprits qui en méconnaissent les éléments. Pendant que ces projets suivaient leur cours et ne répandaient que d'illusoires espérances, des hommes sérieux s'occupaient en silence de cette grande question, et cherchaient à combiner les données exactes acquises par la science pour construire, dans l'état actuel des choses, les machines électro-magnétiques capables du plus grand effet utile. M. Froment s'est distingué des premiers parmi les hommes habiles qui joignent à la théorie la connaissance la plus approfondie de la mécanique pratique; il a imaginé et exécuté plusieurs systèmes de machines électro-magnétiques tous remarquables par d'ingénieuses dispositions et par la perfection du travail. Plusieurs de ces machines font le service habituel de ses ateliers, les unes pour conduire ses grandes machines à diviser qui donnent des résultats d'une irréprochable précision, les autres pour imprimer le mouvement aux tours, aux machines à raboter, etc.

Le système qui est destiné à ce dernier usage est représenté (Pl. 25, Fig. 22, 23, 24, 25) à l'échelle de $\frac{1}{20}$ de grandeur naturelle; cette machine est à peu près de la force d'un cheval.

La figure 25 est une élévation d'ensemble;

La figure 23 est la coupe horizontale;

La figure 22 indique la transmission du mouvement;

La figure 24 explique la distribution des courants électriques.

Le bâti de cette machine se compose de quatre montants de fonte *a*, *b*, *c*, *d*, de 2 mètres de hauteur, fixés en bas à un socle de fonte, et solidement assemblés en haut; il y a de plus au milieu encore un assemblage de consolidation; deux de ces montants seulement sont visibles sur la figure 25; mais leur position en carré est indiquée sur la coupe (Fig. 23) qui fait voir en même temps la forme de leur section et les nervures qui les consolident.

Sur chacun de ces montants sont fixés dix électro-aimants, cinq au-dessus du milieu, cinq au-dessous; les deux bobines d'un électro-aimant sont placées l'une au-dessus de l'autre; les vingt fers des vingt bobines sont dans le même plan vertical et dirigés vers le centre de l'appareil, comme l'indique la figure 23.

L'axe du bâti est occupé par un arbre de fer qui reçoit un mouvement rapide de rotation sur lui-même; on en voit la coupe (Fig. 23), la partie supérieure (Fig. 22) et l'extrémité inférieure (Fig. 25); ici, il repose sur un coussinet de bronze plein d'huile; au milieu il est soutenu et appuyé par trois galets tournants qui l'empêchent de se courber; en haut, il passe dans un coussinet, et son extrémité supérieure porte enfin une roue d'angle (Fig. 22) qui donne le mouvement à la roue d'angle verticale *e*, montée sur le même axe que la poulie motrice *f*, destinée à transmettre le mouvement aux machines par une courroie ordinaire.

Voici comment l'arbre central de fer reçoit son mouvement de rotation : il porte sur sa hauteur dix manchons de bronze, fixés à vis, pareils à celui du haut, qui est représenté (Fig. 22); sur le pourtour de chaque manchon s'adaptent verticalement six barreaux de fer doux, comme on le voit (Fig. 23, 25), ayant les dimensions convenables pour être vivement aimantés ou plutôt vivement attirés lorsqu'ils arrivent dans leur révolution devant chacun des quatre électro-aimants de leur étage. C'est cette attraction qui devient la force motrice, et qui imprime à l'arbre central le rapide mouvement de rotation dont il doit être animé. Mais la condition indispensable, on le conçoit, est que l'électro-aimant retombe à l'état naturel aussitôt que le fer est passé devant lui; car, s'il restait aimanté, il l'attirerait encore après son passage et détruirait la rotation qu'il avait imprimée d'abord; il faut donc que le fer de l'électro-aimant et celui des barreaux soient sans force coercitive, sous peine d'avoir des pertes de

forces considérables. C'est pour cela qu'il faut régler la distribution des courants dans les électro-aimants avec des précautions particulières.

M. Froment a adopté la disposition suivante : supposons d'abord qu'il n'y ait qu'un seul étage au lieu de dix, et qu'un seul électro-aimant dans cet étage au lieu de quatre; puisque le manchon porte six barreaux, si le premier barreau est juste devant l'électro-aimant, quand le manchon aura tourné de $\frac{1}{12}$ de circonférence, le premier et le deuxième barreau seront à la même distance de l'électro-aimant; il faut donc que le courant soit supprimé, ou, comme on dit, qu'il y ait rupture du circuit pendant ce $\frac{1}{12}$ de circonférence, puis fermeture pendant le $\frac{1}{12}$ suivant et ainsi de suite alternativement; ou enfin six ruptures et six fermetures alternatives et de même durée pendant chaque révolution entière du manchon. Imaginons en conséquence un axe de rotation portant six galets d'ivoire pareils à ceux de la figure 24, une pièce flexible de métal *g* recevant le pôle positif de la pile et portant un bouton de platine *h*, un ressort *i* recevant le pôle négatif de la pile et portant de même un bouton de platine *h'*; ce ressort est réglé pour être repoussé par chaque galet, de telle sorte que *h* soit mis en contact avec *h'* pendant $\frac{1}{12}$ de circonférence, et que dans l'intervalle de deux galets consécutifs, pendant le $\frac{1}{12}$ de circonférence suivant les boutons *h* et *h'* ne se touchent pas; nous aurons ainsi avec une parfaite régularité les six fermetures et les six ruptures voulues pour que l'électro-aimant donne tout l'effet utile qu'il est capable de donner.

Cependant il y a quatre électro-aimants au lieu d'un, il faut qu'ils agissent tous et qu'ils agissent à propos; pour cela, nous remarquerons que les deux électro-aimants opposés *a* et *c* (Fig. 23) sont placés de la même manière par rapport aux barreaux tournants, ils doivent agir ensemble et se reposer ensemble; il suffit donc d'introduire le courant simultanément dans leurs bobines et de le supprimer simultanément. Quant aux deux électro-aimants des montants *b* et *d* (Fig. 23), il est facile de voir qu'ils doivent précisément agir quand les deux autres se reposent ; alors il suffit de mettre de l'autre côté du distributeur (Fig. 24) un système pareil *g' i'*, qui entre juste en action quand le premier entre au repos, et *vice versa*.

Reste à faire mouvoir les galets d'ivoire, ou plutôt l'axe qui les porte; rien n'est plus facile; cet axe est disposé sur le pro-

longement de l'axe xy (Fig. 22) et il en reçoit le mouvement par les deux petites manivelles z; il y a de plus un moyen de régler sa position relative pour que les barreaux soient bien dans la situation qu'ils doivent avoir à l'instant des ruptures et fermetures.

Enfin il faut appliquer ce principe aux dix étages d'électro-aimants, et l'on conçoit qu'il n'y a à cela aucune difficulté : seulement, il faut dix systèmes de chacun six galets pareils au précédent ; ils sont tous montés sur le même axe et enfermés dans le tambour t (Fig. 22). La liaison des divers systèmes d'électro-aimants avec leurs distributeurs de courants est indiquée sur le montant aa (Fig. 25) et se comprend aisément d'après ce qui vient d'être dit. J'ajouterai cependant que les dix distributeurs sont disposés en hélice, le dixième étant tourné de $\frac{1}{12}$ de circonférence par rapport au premier, et les autres de quantités intermédiaires; que les barreaux de fer doux correspondants dans les différents étages ne sont pas non plus dans la même verticale : ainsi les impulsions des forces attractives se trouvent considérablement multipliées dans la durée de chaque révolution, ce qui assure à ces machines une constance de vitesse qui ne peut être obtenue avec la même facilité par aucun autre mécanisme.

Sur ce principe, qui me paraît très-supérieur à tous ceux qui sont venus à ma connaissance, on pourrait sans nul doute faire des machines électro-magnétiques très-puissantes; mais, dans l'état actuel des choses, elles seraient bien loin d'être économiques par comparaison avec les machines à vapeur; et le modèle que nous venons de décrire donne une juste idée du poids considérable de la matière qui devrait entrer dans leur composition.

330 *bis*. Appareil électro-physiologique de M. Boeck. — Depuis quelques années les physiologistes ont fait des recherches d'un grand intérêt sur plusieurs phénomènes de la vie organique dont on peut aujourd'hui commencer l'étude, grâce aux découvertes récentes de l'électro-magnétisme. M. Helmholtz, de Berlin, est entré des premiers dans cette nouvelle carrière, et dans les beaux mémoires qu'il a publiés depuis 1850, on peut voir qu'il est devenu possible de résoudre, par exemple, des questions telles que celles-ci :

Déterminer le temps qui s'écoule entre l'excitation d'un nerf

et le commencement de la contraction musculaire qui en est la suite;

Mesurer la durée de la contraction elle-même, et tracer la courbe des phases suivant lesquelles elle se développe et s'affaiblit;

Apprécier le temps qu'une excitation donnée met à se propager jusqu'au muscle, suivant les points plus ou moins éloignés du nerf où elle a été produite;

Trouver le temps qui s'écoule entre l'instant où un corps nous touche, où la lumière frappe l'œil, où le son frappe l'oreille, et l'instant où, par la pression du doigt sur une touche, nous pouvons marquer à l'extérieur que la sensation est perçue.

Dans la plupart de ses recherches, M. Helmholtz a mesuré le temps, qui se compte ici par millième de seconde, en appliquant le principe que j'ai fait connaître en 1844 (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*), et dont je donne l'idée un peu plus loin, n° 347.

Les appareils de M. Helmholtz ne me sont connus que par les descriptions qui se trouvent dans les traductions de ses mémoires; mais M. Boeck, professeur de physiologie à la Faculté de médecine de Christiania, a imaginé récemment un appareil qui a précisément pour objet des recherches analogues; il l'a présenté à l'Académie des sciences (*Comptes rendus de l'Acad.*, août 1855), sous le nom de *kymographion* perfectionné; j'essayerai d'en donner ici une esquisse, parce que j'ai eu l'avantage de voir avec mes illustres confrères de l'Académie, MM. Rayer et Bernard, les expériences très-intéressantes de M. Boeck. Un mouvement d'horlogerie très-précis fait tourner autour d'un axe vertical un tambour de métal, parfaitement cylindrique, de 15 à 20 centimètres de hauteur sur 12 centimètres de diamètre. Une petite portion seulement de ce tambour est représentée en *a* (PL. 27 A., FIG. 6); sa vitesse de rotation est toujours uniforme, mais elle peut être à volonté grande ou petite, suivant la nature des expériences; il est destiné à recevoir la trace des phénomènes que l'on étudie : pour cela il est revêtu d'une feuille de papier mince, ferme, bien glacé, dont la surface a été couverte d'une couche de noir de fumée au-dessus d'une lampe où brûle un mélange de parties égales d'alcool et d'essence de térébenthine. Les plumes qui écrivent, ou plutôt les burins qui gravent sur le papier enfumé, sont des pointes fines de verre, *b* et *c*, ri-

gides et cependant élastiques par la forme qu'on leur donne; en géuéral il y en a deux, chargées de marquer des choses ou des époques différentes.

La figure 5 représente seulement les expériences que l'on peut faire sur le muscle *d* d'une grenouille, soit en faisant passer le courant d'induction par le muscle lui-même (disposition *e*), soit en le faisant passer par les longueurs *f'* ou *f''* du nerf (dispositions *e'* ou *e''*). Voici à cet effet l'arrangement des courants : on emploie deux *batteries* distinctes, *f* et *g* (le mot batterie ne veut pas dire que les courants sont très-forts; il est employé ici d'une manière générale, même pour désigner un seul élément très-faible); le circuit de la batterie *g* vient passer dans une bobine *h*, qui ne contient pas de fer doux, c'est là que le courant devient courant inducteur, parce qu'il agit, à chaque fermeture et à chaque rupture, sur la bobine *l*, qui enveloppe la première; la fermeture se fait en *i*, à l'instant où l'armature *j* de l'électro-aimant *k* se met au repos; la rupture se fait au même point *i*, à l'instant où l'armature *j* se met en prise. Le circuit de la batterie *f* va former la bobine de l'électro-aimant *k*, en même temps il aboutit aux deux petites capsules pleines de mercure *m*, *m'*, par conséquent il y a fermeture ou rupture, suivant que le fil mobile *n* plonge ou ne plonge pas dans *m* et *m'*; la troisième capsule *m''* est pareille à *m*, *m'*, elle reçoit l'une des extrémités du fil de la bobine d'induction *l*, après qu'il a été porter le courant dans le muscle ou dans les nerfs; la capsule *m* reçoit l'autre extrémité du fil de la bobine; ainsi le circuit induit est fermé ou rompu, suivant que le fil mobile *n'* plonge ou ne plonge pas dans les capsules *m*, *m''*. Les deux fils mobiles *n*, *n'* n'en font qu'un, qui est replié comme l'indique la figure; leur ensemble est attaché à la tige de verre mobile et verticale *op* qui est suspendue à la partie inférieure du muscle *d*; cette tige porte la plume *c*, et c'est par cet arrangement que celle-ci écrit sur le tambour toutes les variations que le muscle éprouve dans sa longueur. Quand une expérience est terminée, on ôte le papier, on applique sur sa face blanche un vernis qui fixe le noir de fumée, et, ce qui est un avantage considérable du kymographion de M. Boeck, on a ainsi la gravure immédiate de l'impression des lignes que trace la plume sous les impulsions du muscle.

Il nous reste à dire comment s'établit la circulation des cou-

rants. L'expérience étant préparée pour l'une des trois dispositions que représente la figure, on ferme le circuit de la batterie *g*, on laisse ouvert le circuit de la batterie *f*, seulement il y a, sous la main de l'observateur, une touche sur laquelle il n'y a plus qu'à poser le doigt pour fermer le circuit. La tige *op* et les poids qui la chargent (ils peuvent aller en somme jusqu'à 300 grammes) ayant pris leur équilibre sous l'allongement naturel du muscle *d*, on élève, par un mécanisme disposé à cet effet, la tablette qui porte les trois capsules *m*, *m'*, *m''*, de manière que les fils *n*, *n'* touchent la surface de mercure; pendant ce temps-là, le tambour a pris sa vitesse uniforme, la plume *c* est mise en place, et décrirait une circonférence entière ou même plusieurs fois la même circonférence, si l'électricité ne venait pas produire ses effets. Ces préparatifs achevés, on ferme le circuit de la batterie *f*, bientôt l'électro-aimant *k* attire son armature *j*; cet instant est marqué par la plume *b*; au même moment il y a rupture du circuit de *g* et simultanément dans la bobine *l* production du courant induit qui vient agir sur le muscle; la contraction commence, la tige *po* est soulevée, et avec elle la plume *c* qui marque ainsi cette première origine de la contraction, en quittant sa circonférence pour marquer un peu plus haut le passage du point correspondant du tambour. A une certaine période de cette rapide rétraction, les fils *n*, *n'* sortent des capsules *m*, *m'*, *m''*; le circuit induit est rompu; il en est de même du circuit de *f*, l'armature *j* ne tarde pas à se mettre au repos; à cet instant la plume *b* cesse de marquer, et le circuit de *g* se ferme de nouveau, le courant inverse qu'il produit dans la bobine *l* s'y éteint, parce que les capsules *m*, *m''* ne communiquent plus.

Rien ne marque ici la durée du courant induit qui a déterminé la contraction du muscle *d*; on sait par les expériences de M. Helmholtz qu'un courant induit qui dure moins de $\frac{1}{600}$ de seconde produit des contractions qui durent jusqu'à $\frac{1}{3}$ de seconde; il est donc possible que le courant induit ait cessé d'exister avant le moment où la contraction a soulevé les fils *n*, *n'* et rompu à la fois le circuit d'induction de celui de la batterie *f*. Cependant les courbes de M. Boeck démontrent que la contraction passe en quelque sorte instantanément à son maximum, car le trait marqué par la plume *c* paraît vertical; alors la rupture du courant d'induction pourrait se faire ici avant qu'il eût

produit son effet total. A partir du maximum, la contraction, ou plutôt la rétraction du muscle, diminue avec une lenteur relative, l'abaissement graduel et un peu ondulé de la plume *c* marque la période du retour à l'état primitif. Quand le rallongement est devenu tel que les fils n, n' touchent le mercure des capsules, le circuit de f est de nouveau fermé, l'armature j attirée, le circuit de g rompu, et un deuxième courant d'induction développé. C'est ainsi que l'appareil, avec la disposition dont nous parlons, peut tracer toutes les phases des contractions successives produites par la même cause. Or, il arrive qu'après un petit nombre de secousses (8 ou 10), le muscle commence à se paralyser, l'intervalle des contractions augmente de plus en plus, et enfin elles cessent complétement, bien que le même courant continue à l'exciter, car nous nous sommes assurés qu'il n'y a aucune différence sensible de conductibilité.

Cet exemple suffit pour faire comprendre tout ce qu'il y a d'ingénieux et de précis dans le kymographion de M. Boeck, et la grande variété des expériences délicates qu'il permet de faire sur les divers sujets que nous avons indiqués et sur d'autres analogues.

CHAPITRE IX.

Diamagnétisme et magnétisme de tous les corps.

331. Il y a des substances qui sont repoussées par les aimants, on les appelle substances diamagnétiques. — En 1845 M. Faraday fit en même temps deux belles découvertes : la première se rapporte à des propriétés optiques très-extraordinaires que prennent la plupart des substances diaphanes pendant qu'elles sont sous l'influence des aimants ; nous les ferons connaître plus loin (Optique, *lumière polarisée*, chapitre iv, *polarisation rotatoire magnétique*) ; la seconde se rapporte à la propriété non moins extraordinaire que possèdent certaines substances d'être repoussées par les aimants. M. Faraday avait appelé *diamagnétiques* les substances qui jouissent de cette propriété répulsive ; cette dénomination a été adoptée par la science ; de là l'expression de *diamagnétisme* pour désigner l'ensemble des phénomènes que présentent les substances diamagnétiques. Cette découverte a donné une nouvelle importance aux recherches qui avaient été faites autrefois par Coulomb sur le magnétisme de tous les corps, et nous avons cru devoir réunir dans le même chapitre ces deux ordres de phénomènes qui ont d'intimes rapports, bien qu'ils procèdent de forces qui semblent être opposées.

Le bismuth étant le corps le plus diamagnétique, nous allons nous en servir pour indiquer les diverses expériences auxquelles on peut soumettre les corps de cette espèce.

Une petite balle de bismuth d'environ un centimètre de diamètre est suspendue par un fil un peu long près des pièces polaires du grand électro-aimant de Ruhmkorff (Pl. 25, Fig. 1) que nous avons décrit dans le chapitre précédent ; ces pièces sont très-rapprochées, leur distance est un peu moindre que l'épaisseur de la balle qui s'appuie contre leurs extrémités (Fig. 3) ; alors au moment où l'on fait passer le courant, la balle de bismuth est repoussée à une certaine distance et cette répulsion se soutient tant que passe le courant ; mais, au moment où l'on

rompt le circuit, elle vient se remettre en contact avec les pôles pour être repoussée de nouveau avec la même force et la même persistance pendant tout le temps que les communications sont rétablies.

Cette répulsion se manifeste encore d'une autre manière, comme je l'ai indiqué en 1846. L'électro-aimant étant vertical, ses pôles en haut, il suffit de poser sur son extrémité une feuille de papier mince bien tendue et d'y jeter du bismuth en poudre, assez finement pulvérisé dans un mortier d'agate; ces fines poussières, si elles étaient magnétiques, dessineraient le contour du fer de l'électro-aimant en s'attachant et se pressant sur cette ligne plus qu'ailleurs; comme elles sont repoussées, c'est l'effet contraire que l'on observe : le bord du fer est marqué par une bande étroite où aucun grain de bismuth ne peut s'arrêter.

M. Faraday avait observé ce fait fondamental en suspendant avec un fil un petit barreau de bismuth entre les deux pôles de l'électro-aimant; alors, au lieu de se diriger dans la ligne des pôles, comme font les corps magnétiques, le barreau de bismuth se dirige perpendiculairement à cette ligne; c'est ce qu'on exprime quelquefois en disant que les corps magnétiques prennent la direction *axiale* et les corps diamagnétiques la direction *équatoriale*.

On a rappelé à cette occasion que Brugmanns avait observé dès 1778 l'action répulsive du bismuth, que Le Baillif l'avait reproduite en 1828 au moyen de son *sidéroscope*, et que M. Becquerel vers cette même époque avait constaté la position équatoriale de certains corps, sous certaines conditions; ces rapprochements sont intéressants pour l'histoire de la science; mais il est juste d'ajouter que la liaison qui peut exister entre ces anciennes observations et celle de M. Faraday a beaucoup plus d'apparence que de réalité.

Le nombre des corps diamagnétiques est très-considérable : parmi les métaux, le plomb et le zinc paraissent venir après le bismuth, leur action cependant est beaucoup plus faible; parmi les métalloïdes, le phosphore et le sélénium, beaucoup plus faibles aussi que le bismuth, sont un peu plus énergiques que le soufre: parmi les corps composés on remarque comme ayant une assez grande force, l'eau, l'alcool, l'éther, l'essence de térébenthine, la plupart des acides et des dissolutions salines, la cire, le succin, la nacre de perle, l'écaille de tortue, le tuyau de plume, le charbon, etc., etc.

Les liquides peuvent être soumis à l'épreuve directement, soit par la méthode de M. Faraday, en les enfermant dans des tubes très-minces de verre pour observer s'ils prennent et conservent la position équatoriale avec plus ou moins de vivacité; soit par la méthode de la balance, qui a été employée par OErsted (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIV, p. 424) et par M. Plücker (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIX, p. 139). L'appareil de M. Plücker est représenté (Pl. 25, Fig. 14); il se compose d'un grand électro-aimant vertical, sur les extrémités duquel on adapte en *a*, *b*, des pièces polaires de diverses formes, suivant le but qu'on se propose; ces pièces, posées en regard l'une de l'autre et plus ou moins rapprochées, forment une sorte de champ magnétique horizontal dans lequel on suspend ensuite les corps que l'on veut éprouver. Au-dessus des pôles s'élève une cage, destinée à former balance de torsion, ou à recevoir une balance ordinaire très-délicate dont toutes les pièces sont de verre; dans ce dernier cas un verre de montre est attaché à l'un des bras de la balance, et vient se poser, d'une manière déterminée, dans le champ magnétique; on le remplit de liquide, on établit l'équilibre pendant que le courant passe et que les pôles exercent une action répulsive; ensuite, après la rupture du circuit, quand il n'y a plus de répulsion, on cherche quel poids il faut mettre dans l'autre bassin pour rétablir l'équilibre.

L'électro-aimant de M. Plücker est à plusieurs fils, ce qui permet d'en faire à volonté un électro-aimant à fil de grande ou de petite section; entre les deux colonnes *n*, *n'*, destinées à porter et à isoler les extrémités des fils de l'électro-aimant, on voit le commutateur *c* au moyen duquel on renverse subitement le sens du courant.

OErsted avait aussi employé ce mode d'observation; mais il s'était surtout appliqué à démêler les phénomènes que présentent dans leurs directions les aiguilles diamagnétiques, suivant les positions qu'on leur donne, soit en les élevant, soit en les abaissant dans le champ magnétique, soit en les plaçant de diverses manières par rapport aux arêtes des pièces polaires. Ces changements de direction, à raison de la hauteur de l'aiguille, de la position de son centre, de la forme des pièces polaires et de l'énergie de l'électro-aimant, sont tellement compliqués que, même pour le bismuth, OErsted n'est pas parvenu à en saisir les lois d'une manière certaine. On trouve bien toujours la position

équatoriale; mais l'on parvient aussi à trouver des positions différentes, et la position axiale elle-même; ce dernier cas se présente, par exemple, quand les pièces polaires étant percées d'une ouverture horizontale correspondent à l'aiguille de bismuth et à la hauteur de cette ouverture.

332. **Les propriétés des substances diamagnétiques dépendent du milieu dans lequel elles sont plongées.** — On doit encore à M. Faraday cette observation importante : que, tel corps qui semble magnétique, qui obéit à l'attraction des pôles, et qui prend la direction axiale lorsqu'on l'observe dans l'air, peut se montrer diamagnétique, être repoussé par les pôles et prendre la direction équatoriale lorsqu'on l'observe dans un milieu différent de l'air et convenablement choisi. Par exemple, le protosulfate de fer, en dissolution très-étendue, paraît sensiblement magnétique : car, s'il est enfermé dans un tube mince de verre et suspendu entre les pôles de l'électro-aimant, il se dirige axialement, suivant la ligne des pôles et avec une certaine force. Une petite cuve de verre remplie d'eau est disposée entre les pôles de telle sorte que le tube de sulfate puisse y être plongé et qu'il se retrouve alors, au milieu de ce liquide, dans la même position magnétique qu'il avait dans l'air; aussitôt que le courant passe, il est attiré de nouveau, et reprend, comme tout à l'heure, sa position axiale. Mais, sans déranger la cuve de verre, on substitue à l'eau une dissolution de sulfate de fer plus concentrée que celle qui remplit le tube, et celui-ci est remis exactement en place dans ce nouveau liquide; alors, quand on ferme le circuit, le tube de sulfate est repoussé; au lieu de se tourner dans la ligne des pôles, il se tourne équatorialement dans la ligne perpendiculaire, et se maintient là avec une force très-marquée. Ainsi un corps n'est pas magnétique ou diamagnétique d'une manière absolue, mais seulement d'une manière relative et dépendante du milieu dans lequel il se trouve; ici il est magnétique, là diamagnétique, suivant le milieu qui l'entoure.

Ce fait fondamental a été vérifié, confirmé et développé par plusieurs expérimentateurs, et particulièrement par M. Plücker et par M. Ed. Becquerel.

333. **Les aimants donnent une courbure extraordinaire à la surface de niveau des liquides magnétiques.** — Les dissolutions des sels de fer, de nickel et de cobalt, sont en général magnétiques à la manière de ces métaux, mais leur force relative

est toujours très-faible, de plus elle est différente d'un sel à l'autre et pour le même sel toujours d'autant plus petite que la dissolution est plus étendue. C'est là ce qu'on reconnaît en éprouvant ces diverses dissolutions dans le même tube ou dans des tubes pareils, entre les pôles d'un électro-aimant, traversé par un courant de même intensité. Mais M. Plücker a rendu ces expériences encore plus curieuses en versant les dissolutions dans un verre de montre qui est ensuite posé sur les deux pôles de l'électro-aimant, comme on le voit (Fig. 6); alors, au moment où l'on fait passer le courant, la surface de niveau se déforme, elle se relève au milieu et se déprime de chaque côté, dans les points qui correspondent à peu près aux arêtes des pièces de contact. Cette forme singulière de la surface subsiste aussi longtemps que le courant; le niveau se rétablit au moment de la rupture du circuit. On peut répéter l'expérience vingt fois ou cent fois de suite avec le même liquide, et les changements de forme, même les plus rapides, se montrent toujours avec la même régularité.

Le protochlorure de fer, à raison de sa grande force magnétique donne la dissolution dont la surface est le plus profondément impressionnée; on ne voit jamais sans surprise sa surface se bomber et se creuser de la sorte, pour se maintenir dans cet équilibre forcé sous l'influence des actions magnétiques.

Ces phénomènes pourraient sans doute être variés de bien des manières; soit en graissant les pièces polaires pour couvrir leur surface supérieure de petites gouttes liquides arrondies; soit en mettant la surface de niveau au-dessus des pôles qui viendraient alors verticalement au-dessus produire une ascension locale; soit en mouillant les arêtes inférieures des pièces polaires avec de grosses gouttes pendantes de liquide qui deviendraient plus courtes et plus ramassées par l'effet de l'attraction.

Les liquides diamagnétiques éprouveraient des effets inverses; M. Plücker a rendu sensible le diamagnétisme du mercure, bien qu'il soit très-faible, en regardant de près les changements de courbure d'une goutte de mercure étalée sur une pièce amalgamée et soumise à la répulsion des pôles.

334. **Les aimants exercent une action répulsive sur la flamme d'une bougie.** — L'action que le courant exerce sur la flamme a été observée pour la première fois, en Italie, par M. Bancalari; ce fait très-curieux a été présenté au congrès scientifique qui s'était réuni à Venise, en septembre 1847.

L'expérience exige des précautions particulières; elle réussit parfaitement avec l'appareil de Ruhmkorff et nous l'avons représentée (Pl. 25, Fig. 5); on visse sur l'électro-aimant les pièces polaires arrondies, on les approche à quelques millimètres de distance, le support de la bougie est ajusté sur la règle *rr'* (Fig. 1), de manière que la flamme passe entre les sommets des deux cônes polaires; cela fait, on établit les communications, alors l'action magnétique divise la flamme en deux parties qui sont comme soufflées horizontalement de chaque côté de l'axe de l'électro-aimant, et qui se maintiennent ainsi tant que passe le courant.

Les alternatives de fermeture et de rupture de circuit rendent ce phénomène encore plus remarquable.

Toutes les flammes éprouvent des effets analogues; il paraît cependant que la flamme de l'hydrogène est parmi les moins sensibles et la flamme de résine parmi les plus sensibles à cette répulsion magnétique.

M. Quet a remarqué que si l'on présente entre les deux sommets des pièces polaires, le jet de flamme que donne le courant entre les deux pointes de charbon (Fig. 4), il se produit alors un effet de chalumeau des plus intenses; la direction du dard dépend de celle du courant; il se pourrait malgré cela que ce phénomène eût quelque rapport soit avec le précédent, soit avec celui que nous avons signalé (**329**).

335. L'oxygène est très-magnétique, les autres gaz simples ou composés paraissent être ou magnétiques à la manière de l'oxygène, mais avec beaucoup moins de force, ou indifférents, ou diamagnétiques. — L'expérience précédente de M. Bancalari a été le point de départ d'un grand nombre de recherches sur le magnétisme ou le diamagnétisme des gaz. On a voulu savoir si la flamme est diamagnétique à la manière du bismuth et de l'eau, si la répulsion qu'elle éprouve est une conséquence de sa haute température, ou de l'ensemble de sa composition chimique, ou plutôt de quelques-uns des éléments qui la constituent. M. Faraday a été des premiers à s'engager dans ces expériences; sa première méthode d'observation consistait à disposer de petits tubes près des pièces polaires de son électro-aimant; puis de faire passer par ces tubes des courants de différents gaz, qui devaient être réunis par l'action magnétique attractive ou dispersés et étalés par l'action magnétique

répulsive. La réunion ou la dispersion étaient constatées, soit par un thermomètre délicat disposé sur le chemin des gaz quand ils avaient été chauffés, soit par d'autres moyens mécaniques ou chimiques quand ils s'écoulaient à la température ordinaire. C'est ainsi qu'il reconnut que le courant d'oxygène est toujours fortement attiré par l'action magnétique des pièces polaires; tandis que d'autres gaz sont à peu près indifférents et d'autres sensiblement repoussés. Prévenu par ses recherches antérieures, comme nous l'avons indiqué plus haut, que le milieu ambiant exerce une influence considérable sur la nature de l'action des pôles, il eut la précaution de produire ses courants gazeux successivement dans des espaces fermés remplis de différents gaz; mais, que l'oxygène s'écoule dans l'acide carbonique, dans le gaz d'éclairage ou dans un autre milieu ambiant, sa présence se manifeste toujours par une vive attraction. Ainsi l'oxygène est magnétique, du moins relativement et à la manière du protosulfate de fer en dissolution étendue, c'est-à-dire qu'il se pourra bien trouver un certain milieu qui le fasse paraître diamagnétique. (*Philosophical Magazine*, t. XXXI, p. 401, année 1847.)

M. Plücker avait cru pouvoir ajouter un fait de plus; il avait cru reconnaître que l'oxygène augmente un peu de volume quand il est soumis à une puissante action magnétique; et il en tirait la conséquence que l'oxygène est diamagnétique. Cette conclusion, à mon avis, n'aurait pas pu être légitime par cela seul que le diamagnétisme n'est qu'une propriété relative; mais la faible expansion dont il s'agit tenait à des causes accidentelles et M. Faraday a établi par des expériences décisives que les gaz ne changent pas sensiblement de volume par les actions magnétiques ou diamagnétiques qu'ils éprouvent.

M. Ed. Becquerel a fait sur le magnétisme des gaz et en particulier sur le magnétisme de l'oxygène, des expériences qui confirment celles de M. Faraday et qui me semblent d'autant plus intéressantes que sa méthode a l'avantage de se prêter à des mesures de comparaison. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVIII, mars 1850 et t. XXXII, mai 1851.) Son appareil est représenté (Pl. 25, Fig. 15, 18); *a*, *b* sont les extrémités d'un puissant électro-aimant en fer à cheval; *c*, *c'* les pièces polaires prismatiques; *d*, *d'* deux parallélipipèdes allongés de fer doux, posés sur les pièces polaires; *e*, *e'* portions saillantes et efficaces des parallé-

lipipèdes *d*, *d'*; ce sont à proprement parler les pôles actifs de l'électro-aimant. On remarque (Fig. 18) qu'ils ne sont pas dans la même ligne, afin que la lunette *l* puisse observer le point de repère qui est tracé sur l'extrémité de l'aiguille *uu'* soumise à l'expérience. Un bloc de bois *f* reçoit une éprouvette fermée en haut par une pièce de métal; celle-ci porte latéralement des robinets pour faire le vide et introduire les gaz, et au milieu une pièce conique bien rodée à laquelle est attaché le fil d'argent dont la torsion doit donner la mesure des forces magnétiques; ce fil a une assez grande longueur et un diamètre de 4 centièmes de millimètre, son degré de torsion est marqué en haut par un cercle gradué sur lequel se lit le mouvement de la pièce conique.

L'aiguille suspendue au fil de torsion est d'abord un petit tube de verre mince de 35^{mm} de longueur sur 7^{mm} de diamètre, pesant $0^{gr},742$; le repère que porte son extrémité étant sous le fil de la lunette, on fait passer dans l'électro-aimant le courant de 30 éléments Bunsen; l'aiguille est attirée par les pôles et il faut tordre le fil de $6^{\circ},35$ pour ramener le repère sous la lunette. Alors, on fait le vide dans l'éprouvette, et l'on remarque que l'aiguille est attirée davantage et qu'il faut maintenant une torsion de $7^{\circ},5$. Cette différence d'un peu plus d'un degré de torsion est, à la vérité, peu considérable; mais, dans un appareil ajusté avec tous les soins qu'exigent les expériences de cette espèce, elle ne peut pas sans doute être attribuée à l'incertitude de l'équilibre. Ainsi l'aiguille de verre est plus attirée dans le vide que dans l'air, ou en d'autres termes, la présence de l'air diminue sa force attractive, comme la présence de la dissolution de sulfate de fer, dans l'expérience de M. Faraday (**332**), diminue la force attractive de l'aimant sur le tube rempli d'une dissolution étendue de sulfate de fer. Par conséquent l'air paraît être une substance magnétique.

M. Ed. Becquerel ayant alors rempli l'éprouvette successivement de différents gaz pour étudier comparativement l'action attractive qu'éprouve l'aiguille de verre dans ces gaz et dans le vide, a reconnu que l'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, ne produisent pas d'effet sensible; tandis que l'oxygène, au contraire, produit un effet qui est environ 5 fois plus grand que celui de l'air, c'est-à-dire que la force attractive qui était dans le vide de $7^{\circ},5$ et dans l'air de $6^{\circ},35$, se trouvait réduite de $1^{\circ},15$

par la présence de l'air, et, par suite d'environ 5°,75 par la présence de l'oxygène ; ainsi dans ce gaz il ne devait rester à l'aiguille qu'une force de torsion de 1°,75.

Ces résultats, qui n'auraient pas été décisifs par leur grandeur absolue, le devenaient davantage par leur grandeur relative dans les gaz de diverses natures. Mais M. Ed. Becquerel est parvenu à lever tous les doutes à cet égard en profitant ingénieusement de la propriété que possèdent certains corps d'absorber des volumes de gaz très-considérables. Les belles recherches que M. Théodore de Saussure a faites autrefois sur ce sujet ont ici trouvé une heureuse application ; le charbon, par exemple, condense sous la pression ordinaire :

Volumes.		Volumes.	
1,75	d'hydrogène.	35,00	d'acide carbonique.
7,50	d'azote.	40,00	de protoxyde d'azote.
9,25	d'oxygène.	85,00	d'acide chlorhydrique.
9,42	d'oxyde de carbone.	90,00	de gaz ammoniac.

Un cylindre de charbon de chêne, de 35 millimètres de longueur sur 10 millimètres de diamètre, pesant $1^{gr},410$, ayant été recuit au rouge dans du sable et soumis à l'expérience dans l'éprouvette, a donné les résultats suivants : dans le vide il était diamagnétique et repoussé, sa force répulsive étant mesurée par un angle de torsion de — 3°,85 ; dans l'oxygène il est devenu magnétique et attiré, sa force attractive étant mesurée par un angle de torsion de + 18°,55 ; dans l'air il a été pareillement magnétique, et attiré, sa force attractive étant mesurée par un angle de torsion de 1°,20. Ainsi la condensation de l'oxygène dans le charbon et même la condensation de l'air, ont produit le même effet que si l'on avait ajouté au charbon quelques parcelles de fer ou d'un autre corps magnétique ; car l'oxygène ambiant et l'air ambiant auraient par eux-mêmes contribué à augmenter la force répulsive qu'il éprouvait d'abord dans le vide. Ainsi l'oxygène est très-magnétique et l'air lui-même est magnétique ; mais, l'air ne paraît être magnétique que par l'oxygène qu'il contient ; car, l'azote pur condensé dans le cylindre de charbon, à la manière de l'oxygène, n'a produit aucun changement sensible ; la force répulsive est restée ce qu'elle était dans le vide.

L'acide carbonique, au contraire, et le protoxyde d'azote semblent, par leur condensation, augmenter un peu la force répulsive du charbon, mais dans une très-faible proportion.

M. Plücker ayant fait plus récemment des expériences sur les gaz par sa méthode de la balance ordinaire, comme nous l'avons indiqué plus haut, a été conduit aux résultats suivants (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXIV, mars 1852) :

L'oxygène, comme corps magnétique, paraît doué d'une certaine force coercitive;

Le bioxyde d'azote est fortement magnétique, presque autant que si l'oxygène et l'azote qui le composent étaient simplement mélangés;

L'acide azoteux à l'état de gaz est encore magnétique, mais moins que le bioxyde d'azote; à l'état liquide il est diamagnétique;

L'acide hypoazotique à l'état de gaz est à peu près insensible au magnétisme; mais à l'état liquide il est fortement diamagnétique.

336. Comparaison des pouvoirs magnétiques et diamagnétiques des différents corps. — M. Plücker et M. Ed. Becquerel se sont particulièrement occupés de cette question; l'un en mesurant les effets au moyen d'une balance ordinaire très-sensible, l'autre en les mesurant au moyen de la torsion d'un fil d'argent de 45 millièmes de millimètre de diamètre. Il suffira d'ajouter quelques mots à ce que nous avons déjà dit pour faire comprendre le procédé de M. Ed. Becquerel; son appareil est représenté (Pl. 25, Fig. 16, 17, 18); *a*, *b* représentent les extrémités de l'électro-aimant en fer à cheval, et les pièces polaires comme nous l'avons expliqué dans l'article précédent (335); l'aiguille soumise à l'expérience est suspendue au fil de torsion (Fig. 16); au-dessous d'elle il y a, sur le support de bois *f*, une petite auge contenant un liquide destiné à amortir les oscillations; pour cela on y fait plonger la petite balle qui est suspendue à l'aiguille, et qui donne au fil une tension convenable; quand le courant ne passe pas dans l'électro-aimant, la torsion est nulle et l'on amène sous la lunette *l* le repère qui est tracé à l'extrémité de l'aiguille; quand le courant passe, l'aiguille magnétique est attirée, l'aiguille diamagnétique est repoussée, ce qui permet de voir de suite dans quelle catégorie se trouve la substance de l'aiguille soumise à l'épreuve; catégorie qui est relative, comme nous l'avons déjà dit, et dépendante du milieu environnant.

Mais pour comparer entre elles, soit les attractions, soit les répulsions, il suffit de produire à la partie supérieure du fil une

torsion convenable qui ramène toujours sous le fil de la lunette le point de repère de l'aiguille. Soient θ, θ', ces angles de torsion pour deux substances; f, f', les forces magnétiques correspondantes, on admet que ces forces sont proportionnelles aux angles θ et θ'; soit qu'elles se trouvent toutes les deux attractives, toutes les deux répulsives, ou l'une attractive et l'autre répulsive.

Ce principe, si simple et si vrai théoriquement, contient cependant en lui-même un grand nombre de conditions qui ne sont pas toujours faciles à reconnaître et faciles à réaliser.

Il suppose :

1° Que la puissance magnétique de l'électro-aimant soit identique dans les deux cas;

2° Que les deux aiguilles que l'on compare soient géométriquement égales et placées de la même manière dans l'appareil;

3° Que les points d'application des résultantes soient les mêmes dans les deux aiguilles et que l'axe de la lunette soit placé à l'égard du cercle que décrivent les aiguilles, de telle sorte qu'à droite ou à gauche de cet axe les intensités des résultantes croissent ou décroissent de la même manière;

4° Que les actions magnétiques ou diamagnétiques qui peuvent s'exercer sur l'air qui touche les pièces polaires ou en général sur le milieu ou les milieux qui séparent les aiguilles des pièces polaires elles-mêmes, ne changent pas les rapports des actions magnétiques ou diamagnétiques qui doivent s'exercer sur les substances des aiguilles elles-mêmes.

M. Ed. Becquerel a eu égard à la première de ces conditions; il a fait passer le courant sur une boussole de sinus afin d'en avoir l'intensité dans chaque expérience, et il a reconnu que pour la même aiguille l'intensité de l'action magnétique mesurée par la torsion était en général sensiblement proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Ainsi le rapport des forces magné tiques f, f' de deux aiguilles est donné par la relation

$$\frac{f}{f'} = \frac{\theta}{\theta'} \cdot \frac{\text{Sin}^2 d'}{\text{Sin}^2 d};$$

θ, θ' étant les torsions observées; d, d' les déviations de la boussole des sinus pendant la première et la seconde expérience.

Quant aux autres conditions, M. Ed. Becquerel n'en parle pas d'une manière explicite et je suis porté à croire qu'elles n'ont

pas été assez exactement appréciées pour que les résultats auxquels il est parvenu puissent être regardés comme définitifs.

En 1853, M. Faraday a monté une balance de torsion très-précise pour comparer les pouvoirs magnétiques ou diamagnétiques de diverses substances. La torsion était produite par un fil de platine dur de 60 centimètres de longueur, et d'un diamètre tel que 1 mètre pesait seulement 90 centigrammes; l'aimant était un aimant naturel, construit par Logeman, d'après les procédés du docteur Elias, il pesait 50 kilogrammes et pouvait porter plus de 4 fois son poids. (*Experimental rescarches*), III[e] vol. page 497, London, 1855.)

Les substances soumises à l'épreuve étaient ramenées vers les armatures à une distance fixe de $15^{mm},24$; cette position était appréciée avec une grande exactitude, au moyen d'une lunette fixe et d'un miroir attaché au fléau de verre de la balance de torsion, dans la verticale du fil de platine.

Le tableau suivant contient les résultats des expériences : l'effet diamagnétique de l'eau pure est pris pour unité, et toutes les substances diamagnétiques sont précédées du signe —, tandis que les substances magnétiques sont précédées du signe +; les comparaisons sont faites à volume égal et à la température de $15^{\circ},5$ centigrades, les gaz étant pareillement à la pression ordinaire de 76 centimètres.

Tableau des pouvoirs magnétiques et diamagnétiques de diverses substances, par M. Faraday.

Proto-ammoniure de cuivre...	+ 1,3896	Camphre...................	— 0,8550
Per-ammoniure de cuivre....	+ 1,2405	Camphine.................	— 0,8588
Oxygène....................	+ 0,1812	Huile de lin..............	— 0,8857
Air.........................	+ 0,0362	Huile d'olive.............	— 0,8861
Gaz oléfiant................	+ 0,0062	Cire......................	— 0,8876
Azote......................	+ 0,0031	Acide azotique............	— 0,9106
Vide.......................	0,0000	Eau.......................	— 1,0000
Acide carbonique............	0,0000	Ammoniaque liquide........	— 1,0197
Hydrogène..................	— 0,0010	Bisulfure de carbone......	— 1,0315
Ammoniac (gaz).............	— 0,0052	Dissol. saturée d'azotate de pot.	— 1,0360
Cyanogène..................	— 0,0093	Acide sulfurique..........	— 1,0815
Verre......................	— 0,1884	Soufre....................	— 1,2215
Zinc, pur..................	— 0,7723	Chlorure d'arsenic........	— 1,2602
Éther......................	— 0,7975	Borate de plomb fondu.....	— 1,4131
Alcool absolu..............	— 0,8147	Phosphore.................	— »
Essence de citron..........	— 0,8282	Bismuth...................	—20,3690

Le nombre relatif au phosphore ne se trouve pas dans la colonne des nombres de M. Faraday.

M. Ed. Becquerel a repris, avec la balance ordinaire, la détermination des pouvoirs magnétiques de l'oxygène de l'air et du deutoxyde d'azote, rapportés aussi au pouvoir diamagnétique de l'eau (*Ann. de Chim. et de Phys.*, juin 1855, page 209); ses résultats : oxygène, + 0,1823; deutoxyde d'azote, + 0,0498; air, + 0,0383; eau, — 1, diffèrent peu de ceux de M. Faraday; le ballon qui contenait successivement l'eau et les gaz, s'approchait de l'armature creusée en sphère, à des distances comprises entre 5 et 10 millimètres. Il a aussi fait la même comparaison pour quelques métaux.

Cuivre pur	— 1,68	Or pur	— 3,47
Id. (dépôt galvanique)	— 1,41	Or natif	— 2,41
Argent pur	— 2,32	Bismuth	— 22,67

337. Actions magnétiques dépendantes de la structure des corps. — M. Faraday avait remarqué, dès 1849, que les cylindres de bismuth ne se comportent pas tous de la même manière entre les pôles des aimants, et que souvent la direction d'équilibre change avec le méridien du cylindre que l'on tourne dans le plan vertical de suspension; en recherchant les causes de ces variations, il avait reconnu qu'elles dépendent des formes cristallines. Alors, en isolant des cristaux de bismuth d'un volume un peu considérable, il avait constaté l'influence d'un certain plan de clivage et d'un axe *magnéto-cristallin* qui lui est perpendiculaire.

A peu près à la même époque, M. Plücker remarquait, de son côté, que la plupart des cristaux diaphanes, comme le quartz, la chaux carbonatée, la tourmaline, etc., ont aussi la propriété de prendre des directions particulières lorsqu'on les soumet à l'expérience entre les pôles d'un électro-aimant puissant.

On a fait, depuis, des recherches nombreuses sur les phénomènes de cet ordre qui ont sans doute un haut degré d'intérêt; mais je dois me borner à citer ici le fait seul dans sa plus grande généralité, parce que les opinions sont encore très-partagées en ce moment sur les rapports que ces directions singulières peuvent avoir, soit avec les formes cristallines elles-mêmes, soit avec les propriétés optiques auxquelles on a essayé de les rattacher. Quelques observations récentes semblent même indiquer que la structure fibreuse sans cristallisation, comme celle que l'on peut donner, par exemple, à la gutta-percha, suffit pour modifier sensi-

blement les actions que les aimants sont capables d'exercer sur un corps.

338. Hypothèses qui ont été proposées pour expliquer les phénomènes diamagnétiques. — M. Ed. Becquerel est, je crois, le premier qui ait essayé d'appliquer d'une manière systématique le principe d'Archimède à l'explication du diamagnétisme; son opinion sur ce sujet est développée dans son premier Mémoire (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVIII, mars 1850), et reproduite à peu près textuellement dans son second Mémoire (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXII, mai 1851). M. Plücker a proposé aussi le principe d'Archimède, mais sa publication française est un peu postérieure (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIX, juin 1850), et son hypothèse est essentiellement différente; il n'admet aucunement l'idée fondamentale de M. Ed. Becquerel.

Essayons de faire comprendre, en peu de mots, ces deux hypothèses, d'indiquer leur caractère distinctif, et quelques-unes des conséquences auxquelles elles semblent conduire.

Quand M. Faraday a eu démontré que les actions magnétiques peuvent être rendues sensibles sur des masses fluides, par exemple, sur les dissolutions de fer, de cobalt et de nickel, le champ de la théorie s'est trouvé considérablement élargi. Jusque-là, les phénomènes s'expliquaient par la fixité des éléments magnétiques; on cherchait des résultantes entre des éléments invariables de position, et il n'y avait aucun compte à tenir des pressions mécaniques que les éléments matériels pouvaient recevoir et transmettre aux éléments voisins. Dès qu'on passe aux fluides, tout est changé; la question prend une autre face; il s'agit alors de trouver les conditions d'équilibre d'une masse fluide au sein de laquelle se trouve un nombre infini de centres attractifs ou répulsifs, dont les actions s'étendent à de grandes distances en décroissant, suivant certaines lois qui peuvent dépendre elles-mêmes de la nature du fluide et peut-être de sa compressibilité, de sa cohésion, de sa structure moléculaire et de ses autres propriétés physiques ou chimiques. Le problème prend encore un autre caractère, lorsqu'au lieu de considérer ces effets de pression dans une masse indéfinie, on les considère dans une masse finie et limitée par des faces, des arêtes et des angles plus ou moins éloignés des centres d'action et diversement placés à leur égard; et à plus forte raison lorsqu'au lieu d'un seul fluide, on suppose plusieurs couches superposées et diversement épaisses

de fluides différents par l'inégalité de leur énergie. C'est ainsi que les expériences de M. Plücker sur les courbures des surfaces de niveau me semblent avoir un véritable intérêt, parce qu'elles sont la manifestation la plus apparente et la plus mesurable des pressions que peuvent produire les aimants dans les masses fluides; il serait curieux d'étudier les changements que ces courbures peuvent éprouver par l'augmentation ou la diminution des pressions superficielles.

Les observations que M. Faraday a faites sur les gaz, particulièrement sur l'oxygène, ne me semblent pas absolument en contradiction avec celles de M. Plücker sur les liquides magnétiques; la permanence du volume de l'oxygène pourrait tenir ou à la faiblesse de l'action, ou à ce qu'elle ne s'exerce que sur une petite partie de la masse, ou peut-être à ce que les actions attractives et répulsives se compensent en partie pour certaines formes de l'appareil. Quelle que soit celle de ces circonstances qui ait le plus de part au phénomène, il n'en résulte pas moins que, sous l'influence des aimants, l'oxygène n'éprouve en somme que des changements de pression excessivement petits.

Cela posé, voici comment M. Ed. Becquerel entend le principe d'Archimède pour expliquer le fait fondamental que nous avons développé (332), savoir : que le même corps qui est attiré dans un certain milieu peut être repoussé dans un autre. Il suppose que l'action élémentaire des centres magnétiques est toujours essentiellement attractive sur tous les corps; mais que cette attraction, quand elle s'exerce sur les fluides, donne lieu à des pressions latérales que doit supporter le corps plongé, et que la résultante de ces pressions ou la *poussée* du fluide, produit sur ce corps une répulsion effective quand elle l'emporte sur la résultante des attractions qui s'exercent sur lui. C'est le principe d'Archimède dans toute sa simplicité, seulement il faut substituer aux actions égales et parallèles de la pesanteur, les actions inégales décroissantes et divergentes des centres magnétiques. Ainsi, dans l'observation primitive de M. Faraday (332), le tube de verre rempli d'une dissolution très-étendue de sulfate de fer est attiré dans l'air et dans l'eau, parce que l'air et l'eau étant des fluides peu attirés par les aimants, leur poussée est très-faible, et moindre que l'attraction qui s'exerce sur la dissolution contenue dans le tube; au contraire, le même tube est repoussé dans la dissolution plus concentrée de sulfate de fer, parce qu'ici

la poussée du fluide l'emporte sur la résultante des attractions qui s'exercent sur la dissolution plus étendue dont le tube est rempli. De même, une tige de verre, par exemple, est attirée dans le vide et repoussée dans l'oxygène; on dit alors qu'elle est ici repoussée, parce que le gaz ayant un pouvoir magnétique plus grand à volume égal, la poussée qui résulte de ses pressions magnétiques, l'emporte sur la résultante des attractions que la tige de verre peut éprouver.

Je ferai remarquer d'abord que cette hypothèse, qui est en apparence si simple et si naturelle, ne paraît pas s'accorder avec la permanence du volume de l'oxygène; car on ne peut pas concevoir aisément que les pressions magnétiques de l'oxygène qui sont assez grandes pour mouvoir une tige de verre se trouvent cependant trop faibles pour déterminer un changement appréciable de volume dans la masse du gaz.

Mais il y a une autre considération qui aurait dû, ce me semble, laisser des doutes plus profonds dans l'esprit de M. Ed. Becquerel, et qui aurait du moins mérité un examen spécial. Le bismuth et beaucoup d'autres corps sont repoussés dans le vide; pour expliquer ce fait, M. Becquerel, fidèle à son principe, qui exclut toute action répulsive pour n'admettre que des actions élémentaires essentiellement attractives se borne à dire : que *le vide est plus magnétique que le bismuth*. Quel est le sens de ces paroles? Comment peut se faire ici l'analyse des forces qui sont en jeu dans le principe d'Archimède? Où sont les pressions, comment se composent-elles pour donner une résultante, une poussée, qui écarte le bismuth et qui lui imprime le mouvement de répulsion qu'il éprouve? C'est ce que M. Ed. Becquerel laisse ignorer de la manière la plus complète. Il semble admettre, au moins d'une manière implicite, que tout naturellement le milieu éthéré qui remplit le vide se comporte en cette occasion comme ferait un fluide matériel; c'est-à-dire qu'il reçoit des pressions par l'influence de l'aimant, que ces pressions de l'éther transmises et arrêtées à la surface du bismuth, se composent entre elles pour donner une résultante ou une poussée qui met en mouvement la masse pondérable. Si telle est sa pensée, il aurait dû la dire et surtout la justifier; car la pression de l'éther du vide sur la surface des corps matériels est une innovation qui me paraît sans précédent et sans exemple dans les lois de la physique et de la mécanique.

M. Plücker se place à un autre point de vue; il applique aussi le principe d'Archimède, mais il l'applique dans les limites où l'expérience en a démontré la rigueur, c'est-à-dire en tant que les pressions s'exercent et se transmettent de la matière à la matière ou d'un fluide à un solide. Il reconnaît donc que les aimants agissent par attraction sur les substances magnétiques, par répulsion sur les substances diamagnétiques; cette répulsion élémentaire une fois admise, le principe d'Archimède pris dans son acception ordinaire suffit en effet pour rendre compte de tous les phénomènes qui ont été observés jusqu'à présent sur l'influence des milieux ambiants; il explique d'une manière simple et satisfaisante pourquoi tout corps magnétique et attiré dans le vide devient diamagnétique et se trouve repoussé lorsqu'il est dans un milieu plus magnétique que lui; et pourquoi tout corps diamagnétique, et repoussé dans le vide, devient magnétique et se trouve attiré, s'il peut être placé dans un milieu plus diamagnétique que lui.

CHAPITRE X.

Télégraphie électrique. — Horloges électriques. — Vitesse de l'électricité. — Vitesse des projectiles dans les armes à feu.

§ 1er. *Télégraphes électriques.*

339. La télégraphie électrique est une preuve frappante de la rapidité avec laquelle les grandes découvertes se développent dans notre siècle. Galvani en 1789, Volta vers 1800, Œrsted en 1820, ont découvert successivement les premiers principes ou les données fondamentales sur lesquelles repose ce nouveau mode de communication; plus tard la théorie de l'électro-magnétisme a été établie sur des bases solides; les lois de la propagation et de l'intensité des courants électriques ont été démontrées par l'expérience, et la possibilité des communications électriques à de grandes distances s'est dès lors présentée à l'esprit de divers savants, non plus comme une idée vague, dont l'électricité ordinaire pourrait revendiquer la première origine, mais comme une vérité acquise, comme une vérité pratique dont les principales conditions pouvaient être déterminées et calculées d'avance. Plusieurs physiciens se sont mis à l'œuvre pour la réaliser, et aujourd'hui, dans presque tous les pays savants de l'Europe et de l'Amérique, il y a des télégraphes électriques de divers systèmes qui mettent en rapport immédiat des villes ou des contrées séparées par de grandes distances.

Quelques années ont donc suffi pour que la théorie reçût de la pratique l'infaillible et éclatante sanction sur laquelle elle avait droit de compter.

Je dois essayer de donner ici une idée des principaux appareils dont on se sert pour résoudre ce grand problème qui prend chaque jour un plus haut degré d'importance.

Laissons d'abord de côté le nombre et la nature des signes qu'il est nécessaire de produire, pour se parler à cent lieues comme si l'on n'était qu'à quelques pas, et commençons par faire comprendre comment il arrive qu'à l'aide de cette puissance merveilleuse on puisse, en levant le bout du doigt à Paris, ébranler, à Brest ou à Marseille, une masse considérable et lui

imprimer à l'instant un mouvement de *va-et-vient* rapide et régulier.

Supposons deux fils de métal *ab* et *cd*, allant de la figure 1 à la figure 2 (Pl. 26), ils auront, si l'on veut, des centaines de kilomètres de longueur; c'est-à-dire que la roue motrice *m*, ou *manipulateur* (Fig. 1), d'où ils partent, peut être aussi loin que l'on voudra de l'électro-aimant *r*, ou *récepteur* (Fig. 2), auquel ils arrivent; seulement ils composent un *circuit* isolé. Parvenus à l'électro-aimant ils sont mis en communication chacun avec l'une des extrémités du fil plus fin qui entoure ses deux branches et qui forme ce qu'on appelle les deux bobines de l'électro-aimant; mais, à leur point de départ, ils sont disposés à l'égard du manipulateur de telle façon qu'ils reçoivent ou ne reçoivent pas le courant, suivant que l'on ferme ou que l'on ouvre le circuit. Il importe de bien comprendre ce que c'est que la *fermeture* et la *rupture* du circuit; c'est la première et la plus importante opération de toute la télégraphie électrique. Le contour de la roue *m* a été divisé en six parties égales, dont trois ont été alternativement entaillées pour recevoir du bois, de l'ivoire ou en général un corps non conducteur; elles sont ombrées sur la figure; les trois autres sont restées métalliques; le ressort *x* presse le contour de la roue et se trouve ainsi en contact alternatif avec les portions conductrices et non conductrices lorsqu'on la fait tourner au moyen du bouton *f*; le ressort *y* presse l'axe de la roue qui est lui-même de métal; ajoutons enfin que les deux pôles d'une pile de force convenable arrivent l'un en *p*, l'autre en *n*, que *p* communique avec l'extrémité *a* du fil *ab*, que *n* communique avec le ressort *x*, tandis que *y* communique avec l'extrémité *c* du fil *cd*. Cela posé, on voit que le manipulateur étant dans la position que représente la figure, le courant ne passe pas, le circuit est ouvert ou rompu; mais, si l'on fait tourner le manipulateur, à l'instant où la portion métallique vient toucher le ressort *x*, le circuit se ferme : le courant partant du pôle positif se propage dans le fil *ab*, comme l'indique la flèche, dans les bobines de l'électro-aimant *r*, dans le fil *dc*, arrive au ressort *y*, à l'axe de la roue, à son contour, au ressort *x* et enfin au pôle négatif. Et il passe de la sorte aussi longtemps que le ressort *x* touche la portion métallique du contour; aussitôt que le mouvement de rotation ramène sous le ressort la deuxième portion non conductrice, il y a de nouveau rupture du circuit, cessation du

courant; puis, de nouveau fermeture et passage du courant quand vient la deuxième portion métallique; puis enfin, rupture et fermeture alternatives, quand on fait tourner le manipulateur d'un mouvement régulier et continu.

Nous avons vu (**291**) qu'il suffit d'un millième, d'un dix-millième de seconde, pour que le courant s'établisse dans tout le circuit avec toute son intensité; par conséquent, on pourra tourner le manipulateur à raison de 1 tour, 10 tours ou même 100 tours par seconde sans craindre que ces alternatives si rapides de fermeture et de rupture ne déterminent pas, avec une régularité parfaite, le passage et l'interruption ou cessation du courant, sauf les phénomènes d'induction.

Examinons maintenant ce qui se passe dans le récepteur (Fig. 2). Puisque le magnétisme est développé dans les barreaux d'acier par un coup de foudre, par un éclair, par l'étincelle d'une bouteille de Leyde, d'une batterie ou d'une pile, il est certain qu'il sera développé dans l'électro-aimant à chaque passage du courant, quelque rapide qu'il puisse être; ainsi, dans la durée d'une seconde, l'électro-aimant pourra être 100 fois aimant et 100 fois cesser de l'être, si, dans cet intervalle, on fait avec le manipulateur 100 alternatives de fermeture et de rupture du circuit. Donc, si l'on dispose, en présence de l'électro-aimant, un levier de bois *ghi*, mobile autour du point *h*, retenu par le ressort *k* et portant une armature de fer doux destinée à servir de *pièce de contact*, ce levier sera, dans une seconde, 100 fois attiré et 100 fois abandonné à lui-même ou relevé par l'effet du ressort *k*; par l'attraction il viendra battre contre l'arrêt *t*, par l'action du ressort il sera relevé contre l'arrêt *t'*; ainsi il fera 100 vibrations entre ces deux arrêts. C'est, au reste, ce que nous avons déjà démontré (**247**) avec l'ingénieux appareil de M. Froment, qui compte lui-même le nombre de ses vibrations par la place qu'occupe dans la gamme le son qu'il rend; les fermetures et les ruptures du circuit s'y font autrement, mais le résultat est le même.

Cependant le nombre des vibrations que l'on peut ainsi obtenir ne dépend pas seulement de la vitesse du manipulateur, elle dépend encore de la qualité du fer de l'électro-aimant, de celle du fer de l'armature, de la tension du ressort et de la masse totale du levier qui doit exécuter ces mouvements. Il ne suffit pas que la décomposition du magnétisme se fasse rapidement, il faut aussi que la recomposition se fasse, sinon avec la même

rapidité, du moins avec une rapidité très-grande ; or, il y a des fers qui ne jouissent pas de cette dernière propriété, ce sont ceux qui ont une force coercitive trop marquée ; ils sont tout à fait impropres à la construction des électro-aimants télégraphiques ; l'armature resterait adhérente pendant la durée de la rupture du circuit et l'on n'aurait pas de vibrations, ou du moins elles seraient lentes et incertaines.

Quant à la tension du ressort et à la masse du levier, on comprend sans peine leur influence, une masse double exigeant une force double pour prendre la même vitesse, on voit qu'un levier léger pourra vibrer beaucoup plus vite qu'un levier trop pesant ; car, en augmentant la force de la pile et les quantités de magnétisme développées, on augmente dans une grande proportion les lenteurs de la décomposition et surtout de la recomposition ; le ressort devra lui-même se régler sur la force de la pile. S'il est trop tendu, les faibles courants ne pourront pas abaisser le levier qui restera pressé contre son arrêt supérieur *t'* ; et si le ressort n'est pas assez tendu, il sera incapable de relever le levier assez vite pendant la rupture du circuit, le fer de l'armature restant alors attiré par les restes de fluide qui ne sont pas instantanément recomposés.

Il y a donc des précautions à prendre, des conditions délicates à remplir lorsqu'on veut obtenir des vibrations rapides ; mais il arrive ici, comme dans toutes les actions mécaniques, que l'on gagne du côté de la masse ce que l'on perd du côté du temps ; et, si l'on opère avec lenteur on pourra mettre en mouvement des masses beaucoup plus grandes.

On se rappelle que les électro-aimants peuvent avoir des degrés de force très-différents, les uns étant construits pour porter des milliers de kilogrammes, les autres plus petits et plus faibles pour porter seulement quelques grammes ; ceux-ci sont destinés aux mouvements rapides ; on ne met en leur présence que de petites armatures et des leviers légers ; les premiers sont destinés aux mouvements très-lents, il faut mettre en leur présence de grosses armatures et des leviers pesants, mais les uns et les autres peuvent recevoir à de très-grandes distances cette force électro-magnétique du courant si facile à produire et à détruire, puisqu'elle naît à l'instant par la fermeture du circuit et qu'elle cesse à l'instant par sa rupture.

Il est donc vrai de dire comme nous l'avons annoncé, qu'à

l'aide du courant électrique, on peut, par le plus léger mouvement du doigt, produire instantanément à des centaines de lieues un mouvement de *va-et-vient* régulier, qui se répétera si l'on veut avec la vitesse d'une corde vibrante, ou avec la lenteur et l'énergie des coups de battant de la plus grosse cloche.

Pour qu'il ne reste aucun doute sur les distances auxquelles ces phénomènes peuvent s'accomplir, rappelons ici en peu de mots les lois que nous avons établies, chapitre VI, par des expériences précises, sur l'intensité des courants; parce que ces lois contiennent toutes les règles pratiques de l'établissement des lignes télégraphiques. Nous avons vu que l'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit, mais qu'elle est en raison directe de la section et de la conductibilité du métal; nous avons vu, de plus, qu'un fil de cuivre de 1000 mètres de longueur et de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, donne assez de force au courant d'une pile de 8 ou 10 éléments pour qu'il exerce des actions vives sur les aiguilles aimantées, ou pour qu'il imprime une énergie considérable à un électro-aimant ordinaire. Supposons que les bobines de l'électro-aimant contiennent chacune 100 mètres de ce fil, il en restera 800 mètres disponibles qui permettront de porter l'électro-aimant à 400 mètres de distance; puisque les 1000 mètres de fil seront alors employés de la manière suivante : 400 mètres pour aller de la pile à l'électro-aimant, 200 mètres dans les bobines, et 400 mètres pour revenir à la pile; on pourra donc faire parfaitement fonctionner l'électro-aimant à 400 mètres de distance; c'est un bien faible parcours il est vrai, mais les lois précédentes vont nous montrer comment il peut s'agrandir. En effet, laissant les 200 mètres de fil fin dans les bobines, remplaçons seulement par du fil plus gros les 400 mètres qui font l'aller et les 400 mètres qui font le retour; remplaçons-les, par exemple, par du fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre ayant la même conductibilité; la section de celui-ci sera 100 fois plus grande que celle du premier, par conséquent on en pourra prendre une longueur 100 fois plus grande, c'est-à-dire de 40 kilomètres, sans rien changer à la force du courant; ainsi au moyen du fil de 1 millimètre pour faire les communications de l'aller et du retour, l'électro-aimant pourra déjà fonctionner avec la même énergie à 40 kilomètres de distance; remplaçons le fil de 1 millimètre par du fil de 5 millimètres de diamètre, sa section étant 25 fois plus grande, on pourra encore

porter l'électro-aimant 25 fois plus loin, c'est-à-dire à 1000 kilomètres, sans lui rien faire perdre de sa force. Voilà comment les lois si simples de l'intensité des courants permettent de calculer avec certitude, d'après une petite expérience de laboratoire, les diverses conditions qu'il y a à remplir pour franchir les distances, pour porter l'électro-aimant où l'on veut, pour faire parler le télégraphe et transmettre tous les signes de la pensée, à 1000 kilomètres, comme à quelques pas.

Tel est le principe fondamental de la télégraphie électrique. On comprend qu'il y a diverses manières d'établir la fermeture et la rupture du circuit; on voit, par exemple, dans la figure 3, une disposition un peu différente de celle de la figure 1; la roue du manipulateur est toujours de métal avec un axe pareillement métallique, mais le pourtour a des dents saillantes, qui viennent, pour produire la fermeture, toucher le plan incliné d'une espèce de dent que porte le ressort un peu rigide x; le vide qui sépare les dents de la roue produit la rupture.

On comprend de même que le levier de l'électro-aimant puisse recevoir des arrangements très-différents : on voit, dans la figure 4, une disposition qui est assez généralement adoptée; le levier de bois se prolonge par un ressort d'acier assez flexible, dont la tension se règle au moyen d'une vis v. Quant à l'électro-aimant, qui est représenté vertical, il peut être horizontal, ou oblique, il peut être aussi complétement supprimé, et remplacé par une petite aiguille aimantée, comme nous le verrons dans le télégraphe anglais.

Ces principes posés, nous allons entrer maintenant dans les détails pratiques et examiner successivement les divers systèmes télégraphiques en les rapportant aux titres suivants :

Télépraphe à *cadran;*

Télégraphe à *signaux conventionnels;*

Télégraphe *écrivant.*

340. Télégraphe à cadran. — Nous comprendrons sous ce titre les divers télégraphes dans lesquels le récepteur est un cadran portant les lettres de l'alphabet et une aiguille centrale qui en fait le tour, avec plus ou moins de vitesse, s'arrêtant successivement, pendant un instant très-court, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ de seconde, devant les lettres qui composent chaque mot de la dépêche; les signalant ainsi à l'attention du stationnaire qui est préposé là pour la recevoir. Les appareils de cette espèce, tous semblables

pour le résultat, peuvent offrir cependant de très-grandes différences, soit dans le mécanisme qui fait mouvoir l'aiguille, soit dans la disposition plus ou moins avantageuse du manipulateur. Nous allons décrire quatre de ces appareils : le télégraphe à cadran ordinaire, celui de M. Breguet, celui de M. Froment et celui de M. Siemens, de Berlin.

Télégraphe à cadran ordinaire. — Le manipulateur est représenté (Pl. 26, Fig. 5) et le récepteur (Fig. 6); indiquons d'abord comment l'aiguille du récepteur accomplit son mouvement de rotation plus ou moins rapide, il nous sera facile de comprendre ensuite comment elle s'arrête pendant le temps voulu, sur la lettre qu'elle doit signaler. Cette aiguille est montée sur une roue *a* qui porte treize dents, taillées en plan incliné par rapport au rayon et par rapport aux deux chevilles *b* et *d* de l'ancre *bcd*, qui reçoit un mouvement de *va-et-vient* de droite à gauche et de gauche à droite ; quand l'ancre va à droite, la cheville *b* frappe sur le milieu du plan incliné de la dent qu'elle rencontre, et, par la pression, fait avancer la roue d'une demi-dent ; quand elle revient de gauche à droite, la cheville *b* se dégage, et la cheville *d*, frappant en son milieu la dent qu'elle rencontre, fait encore avancer la roue d'une demi-dent et dans le même sens. C'est ainsi que le mouvement alternatif de l'ancre imprime à la roue et à l'aiguille qui est fixée sur elle un mouvement de rotation continu ; chaque demi-dent qui passe emporte l'aiguille d'une lettre à la suivante, et pour que sa révolution complète s'accomplisse en 1", il suffit que l'ancre exécute dans cet intervalle treize mouvements vers la droite et treize mouvements vers la gauche ; ces mouvements lui sont imprimés par l'extrémité *g* du levier *gh* de l'électro-aimant horizontal *r*; ce levier agit sur l'ancre par la tige *e*, et il la fait aller et venir autour de l'axe *f* qui la porte; il suffit donc que dans 1" il y ait treize fermetures et treize ruptures du circuit, qui impriment au levier les vingt-six mouvements nécessaires.

Voici maintenant comment le manipulateur (Fig. 5) produit cet effet : il porte aussi un cadran pareil au précédent où les lettres sont disposées dans le même ordre; seulement son aiguille, plus forte, se meut à la main, et entraîne dans son mouvement la roue sur laquelle elle est montée; celle-ci porte treize dents pareilles à celles de la figure 3, avec treize intervalles vides; deux ressorts arrivent à son pourtour, l'un *y* fait l'office du cliquet de la

roue à rochet; il touche toujours la roue et empêche qu'on ne la tourne à rebours; l'autre x ne la touche que par une saillie terminale et à l'instant où la dent passe; il ne la touche pas quand cette saillie se trouve vis-à-vis le vide qui sépare deux dents consécutives. Deux fils de communication, l'un supérieur, l'autre inférieur, dont chacun est lié à l'une des extrémités du fil des bobines de l'électro-aimant, viennent du côté du manipulateur s'attacher, le premier au pôle positif de la pile, et le second, au ressort y, tandis que le ressort x communique au pôle négatif; alors, quand on tourne avec la main l'aiguille du manipulateur, d'un mouvement régulier et continu, à raison d'un tour par seconde, on entraîne la roue et l'on détermine par seconde treize fermetures et treize ruptures de circuit, qui font ainsi faire une révolution juste à l'aiguille du récepteur. Par conséquent, si les deux aiguilles sont d'accord, si, par exemple, elles partent ensemble du signe + qui est inscrit en haut des deux cadrans et qu'on appelle le *final*, elles passeront ensemble sur la lettre A, sur B, sur C, etc., et se retrouveront ensemble sur le final après la révolution achevée. Une fois mises d'accord, elles doivent rester d'accord, à moins que le levier de l'électro-aimant du récepteur ne soit mal réglé et ne laisse passer une fermeture ou une rupture sans exécuter son mouvement.

Cela posé, tout le mystère du télégraphe est éclairci. Veut-on, par exemple, écrire FRANCE, il est convenu que l'on part toujours du final; le stationnaire qui parle prend donc son aiguille au final, et d'un mouvement uniforme, non saccadé, il la conduit sur F, où il fait une petite pause de $\frac{1}{4}$ de seconde; il passe à R où il fait la même pause, à A, à N, à C, à E, en faisant toujours uue pause égale; puis il termine le mot en revenant au final, pour passer ensuite au mot suivant; pendant ce temps-là, l'aiguille du récepteur, par l'effet de l'électro-aimant comme par une invincible sympathie, répète et reproduit à l'instant même tous les mouvements de la première, se mettant en marche avec elle, passant en même temps devant les mêmes lettres, s'arrêtant quand elle s'arrête, juste pendant la même fraction de seconde, reprenant sa route comme elle, au même instant, pour s'arrêter de nouveau avec elle pendant $\frac{1}{4}$ de seconde, et ainsi de suite, avec la plus infaillible fidélité, tant qu'elle est soumise à l'influence du courant. On peut dire que l'aiguille du récepteur est comme une plume merveilleuse qui écrit à cent lieues la

pensée de celui qui envoie la dépêche et qui l'écrit plus vite qu'il n'est donné à la main de le faire avec une plume ordinaire.

Chaque station doit avoir une pile, un manipulateur et un récepteur; le stationnaire qui reçoit la dépêche tient sa pile et son manipulateur en repos au dehors du circuit; il n'a qu'une seule chose à faire : suivre des yeux l'aiguille de son récepteur pour lire ce qu'elle écrit, ou plutôt pour voir ce qu'elle dit. Lorsqu'à son tour il doit prendre la parole, il ôte son récepteur du circuit au moyen d'un commutateur; il y met du même coup sa pile et son manipulateur; il fait sonner l'*alarme*, c'est-à-dire la cloche de la station à laquelle il veut parler; il la fait sonner de nouveau jusqu'à ce qu'on lui réponde; alors son correspondant est prêt à l'entendre; il a aussi, lui, au moyen d'un commutateur, fait une manœuvre inverse : il a ôté du circuit sa pile et son manipulateur pour y introduire son récepteur; il a fait tout cela en poussant un bouton, ce qui lui a pris moins de temps et coûté moins de peine que s'il avait eu à faire un signe de la main pour dire : « Parlez, je vous écoute. »

C'est ainsi que l'on fait la conversation comme si l'on était en présence assis à la même table.

Cet appareil est l'un des premiers qui aient été employés. Nous l'avons décrit sous la forme que M. Froment lui avait donnée il y a quelques années dans le modèle qu'il avait fait pour le cabinet de la Faculté des sciences. On est parvenu depuis à des formes qui donnent encore plus de vitesse et plus de sûreté dans la transmission des dépêches; les dérangements qui se présentent quelquefois ici résultent :

1° De ce que l'encre d'échappement du récepteur donne une assez forte secousse à la roue qu'elle frappe alternativement de droite et de gauche, et qu'elle peut quelquefois laisser passer une dent au lieu d'une demi-dent, à cause de la vitesse d'impulsion;

2° De ce que la main de celui qui fait tourner l'aiguille du manipulateur n'a rien pour se guider et surtout rien pour s'arrêter au point précis où elle doit faire sa pause. Alors la moindre incertitude qu'elle éprouve ou en avant ou en arrière peut produire quelque désaccord entre les aiguilles.

Télégraphe à cadran de M. Breguet. — Il est représenté (Pl. 26, Fig. 10, 11, 11 *bis*). La figure 11 *bis* montre le cadran ou la vue de face du récepteur; on voit que ce cadran est double; il

y en a un pour les lettres et un pour les chiffres; c'est par un signal convenu que celui qui reçoit la dépêche est averti qu'il faut passer du cadran des chiffres à celui des lettres ou *vice versa*.

La figure 11 montre le récepteur vu par derrière et hors de sa boîte, afin que l'on puisse en bien comprendre le mécanisme.

Enfin la figure 10 représente le manipulateur vu de face sur la gauche de la planche.

Cet appareil, qui est digne de la réputation de M. Breguet, et qui a été accueilli avec une grande faveur, se distingue surtout par deux choses importantes :

1° Par un petit mouvement d'horlogerie qui tend sans cesse à faire mouvoir la roue *a* (Fig. 11), sur laquelle est montée l'aiguille du cadran du récepteur; ainsi l'électro-aimant cesse d'être le moteur; il n'est plus qu'un interrupteur, permettant au mouvement d'horlogerie de faire passer une demi-dent de la roue, et l'arrêtant juste au moment où elle est passée, lui permettant de faire passer la demi-dent suivante pour l'arrêter encore et ainsi de suite :

2° Par l'échappement particulier que M. Breguet a mis sous la dépendance de l'électro-aimant pour qu'il remplisse bien sa fonction, c'est-à-dire pour qu'il laisse bien échapper juste une demi-dent à chaque vibration d'aller et une demi-dent à chaque vibration de retour.

Essayons de faire comprendre ce mécanisme qui fonctionne avec tant de régularité.

Deux petites palettes *x* et *y* sont montées sur un axe *cd*, qui est seulement un axe d'oscillation: elles sont à une distance l'une de l'autre égale à la moitié de l'intervalle qui sépare une dent de la suivante, ou à une demi-longueur de dent; leur hauteur est telle, que la dent de la roue *a* ne peut pas passer sans les rencontrer, si elle les trouve sur son chemin ; mais elle ne les y trouve pas toujours, et surtout jamais elle ne les y trouve les deux à la fois ; supposons que la palette *x* soit en prise, qu'une dent soit venue heurter contre elle et s'y arrêter ; alors la palette *y* n'est pas en prise, elle n'est pas même tout à fait sur le chemin de la dent ; elle est, par exemple, un peu en arrière du plan de la roue d'échappement, telle que la représente la figure. Si maintenant l'oscillation de l'axe *cd* amène en avant le haut de la palette *x* et la dégage, le haut de la palette *y* est lui-même amené en avant : elle entre en prise en se présentant sur le che-

min de la dent qui vient la frapper de front et s'y arrêter ; la roue a donc avancé d'une demi-dent et pas davantage. Une oscillation contraire de *cd* fait repasser la palette *y* en arrière en la dégageant, et en même temps ramène en prise la palette *x*, qui arrête la dent suivante et ainsi de suite. C'est donc par les oscillations alternatives de l'axe *cd* que chaque palette est tour à tour mise en prise ou dégagée et que la roue fait en conséquence, à chaque fois, passer une demi-dent. Mais quelle force doit agir sur *cd* pour lui imprimer ces mouvements alternatifs contenus entre les limites prescrites pour que l'appareil fonctionne avec régularité ? Tout le monde le devine : ce rôle est dévolu au levier de l'électro-aimant : ici l'électro-aimant est horizontal : on ne voit que ses deux extrémités circulaires tout en haut de l'appareil : l'armature *t*, mobile autour de l'axe *hh*, porte un levier à fourchette *gi* qui vient prendre une goupille du petit bras *z* de l'axe *cd*. Ainsi, à chaque mouvement de l'armature vers l'électro-aimant, *gi* vient en avant : il dégage *x* et engage *y* : à chaque mouvement de l'armature du côté du ressort qui la rappelle, *gi* passe en arrière ; il engage *x* et dégage *y*; on a donc ici la certitude qu'un seul mouvement ne peut faire passer qu'une demi-dent, et qu'il la fait passer en effet si le ressort de l'armature est convenablement réglé d'après la force du courant.

On aperçoit au coin de gauche sur la vue de face (Fig. 11 *bis*) un petit cadran *c* qui est précisément destiné à régler la tension du ressort de l'armature. On voit aussi sur la même figure un petit bouton *b* qu'il suffit de presser pour remettre l'aiguille du cadran sur le final sans l'intervention du courant, lorsqu'elle se trouve en désaccord par suite de quelques dérangements ou de quelques réparations ; ce bouton imprime à l'armature les mouvements d'oscillation qui font marcher l'aiguille.

Les deux fils de communication arrivent à deux boutons (Fig. 11) qui sont eux-mêmes en rapport électrique chacun avec un bouton pareil, recevant l'une des extrémités du fil de l'électro-aimant, comme l'indique la figure.

Le manipulateur de M. Breguet est aussi disposé d'une manière ingénieuse (Fig. 10) : sous le cadran se trouve, dans une pièce de métal, qui est liée avec l'aiguille, une rainure circulaire et sinueuse, dont une portion *s* a été rendue visible en déchirant la partie correspondante du cadran ; un levier *abc*, mobile

autour du point *b*, va par un appendice et un galet s'engager dans cette rainure, qui fait ainsi, pendant qu'elle tourne, avancer ou reculer le petit bras *ab*, tandis que le grand bras *bc* éprouve un mouvement correspondant et opposé; de telle sorte que l'extrémité *c* vient successivement presser ou le ressort qui est lié à l'arrêt *f*, ou le ressort qui est lié à l'arrêt *d*; dans le premier cas, il y a fermeture du circuit; dans le second cas, il y a rupture. Il faut remarquer que dans cette rainure sinueuse, les parties les plus voisines du centre correspondent aux lettres de rang pair et les plus éloignées aux lettres de rang impair; ainsi, pour A il y a rupture, pour B fermeture, pour C rupture, etc., etc.; par conséquent lorsqu'on fait tourner l'aiguille *g* avec une manette convenablement disposée, on fait tourner en même temps la rainure sinueuse, et l'on détermine ces fermetures et ruptures alternatives du circuit. L'aiguille *g* du manipulateur et l'aiguille du récepteur (Fig. 11 et 11 *bis*) ayant été mises d'accord, on voit que celle-ci fera tous les mouvements de la première comme dans l'appareil à cadran ordinaire, avec cette différence qu'il y a ici beaucoup moins de chances de dérangements.

On voit de plus, sur le pourtour du cadran du manipulateur (Fig. 10), des crans marqués dans le métal et correspondant à chaque lettre; ces crans sont destinés à empêcher toute espèce d'incertitude dans les mouvements de l'aiguille *g*, parce que la manette qui la fait tourner se relève un peu pendant le mouvement, et porte une cheville qui vient s'engager dans les crans pour s'arrêter d'une manière absolue et sans hésitation.

Par ces heureuses dispositions M. Breguet a remédié à la plupart des inconvénients que présentait le télégraphe à cadran ordinaire que nous avons décrit tout à l'heure.

Chaque station doit encore ici être munie d'un récepteur, d'un manipulateur et d'une pile, le récepteur étant mis dans le circuit pour recevoir la dépêche, tandis que le manipulateur et la pile y sont mis à leur tour quand il s'agit de prendre l'initiative et de parler aux autres stations.

Télégraphe à cadran et à clavier de M. Froment. — Le plus récent des télégraphes à cadran, et assurément l'un des plus parfaits, est celui que M. Froment a présenté à l'Académie des sciences et à la Société d'encouragement en 1851 ; cet appareil semble réunir à un très-haut degré tous les avantages désira-

bles dans les télégraphes de cette espèce; la description en a été publiée dans le *Bulletin de la Société d'encouragement* (août 1851), d'après un rapport que j'en avais fait, et j'emprunte à ce recueil les figures qui me semblent les plus propres à faire comprendre ici le principe de cette invention.

Le télégraphe à cadran de M. Froment est surtout remarquable par la perfection du manipulateur, et par la réunion permanente du manipulateur et du récepteur (Pl. 27, Fig. 1, 2, 3, 4); ces figures sont au cinquième de grandeur naturelle.

La figure 4 représente le plan ou la vue en dessus de l'ensemble de l'appareil; on y distingue les vingt-huit touches du clavier, qui forment la partie extérieure du manipulateur, et qui sont sous la main de celui qui envoie la dépêche exactement comme les touches du piano sont sous la main du pianiste; les lettres et les différents signes s'y trouvent gravés en même nombre et dans le même ordre que sur le cadran du récepteur qui est vu en élévation (Fig. 1), et qui se trouve établi à demeure sur la caisse du clavier.

Ce récepteur est muni de sa cloche d'appel dont le marteau est mis en mouvement par un électro-aimant particulier adapté contre la porte de l'appareil et très-ingénieusement disposé. Lorsque cet électro-aimant a été introduit dans le circuit au moyen des commutateurs que l'on voit en *m* et en *n* (Fig. 4), il suffit que l'on presse une touche du clavier dans l'autre station, qui veut correspondre, pour que le marteau donne l'éveil par ses vibrations répétées.

Quant à l'électro-aimant qui fait mouvoir l'aiguille du cadran, il est ajusté à peu près comme celui du récepteur de la planche 26 (Fig. 6), que nous avons décrit plus haut; mais par les formes, les dimensions et le parfait ajustement des pièces, M. Froment a pu donner à l'échappement un degré de précision et de sûreté qu'il n'avait pas.

Essayons maintenant de faire comprendre le mécanisme si habilement combiné du manipulateur, et d'expliquer comment la main de celui qui envoie la dépêche, en se promenant sur son clavier avec la plus grande prestesse, fait marcher l'aiguille du récepteur de la station qui la reçoit, de telle sorte qu'elle signale infailliblement toutes les lettres qui ont été touchées.

Dans la caisse du clavier, à l'extrémité de droite, se trouve

un mouvement d'horlogerie *h* (Fig. 1), destiné à faire tourner sur lui-même un arbre d'acier *aa*, mince, droit et très-rigide qui va d'une extrémité à l'autre de la caisse. Au bout de cet arbre, à droite, est montée une roue à rochet *r*, qui se voit de face dans la coupe transversale (Fig. 2); c'est la dernière roue du mouvement d'horlogerie; elle tend à tourner avec une grande vitesse, par exemple, 1, 2 ou 3 tours par seconde, et par conséquent à imprimer cette vitesse de rotation à l'arbre d'acier *aa* qui la porte; mais il y a un cliquet qui l'arrête, dont le prolongement est un peu saillant en avant, et par conséquent un peu saillant à droite dans la coupe (Fig. 2); il faut presser sur ce prolongement *c* pour dégager le cliquet et permettre à la roue de tourner. Or, il se trouve une longue règle *zz* (Fig. 1), droite, mince et légère, ingénieusement suspendue et équilibrée par une sorte de parallélogramme, qui descend parallèlement à elle-même, pour peu qu'on la presse en un point quelconque de sa longueur; c'est elle qui vient presser à son tour le prolongement du cliquet, et qui donne ainsi à l'arbre d'acier la liberté de tourner; mais, aussitôt que l'on cesse d'agir sur cette règle *zz*, elle reprend sa place, le cliquet la sienne, et tout mouvement s'arrête. On devine que les touches sont précisément destinées à produire cette pression et par conséquent le mouvement de rotation qui en est la suite; en effet, la règle *zz* est suspendue sous les touches, et s'abaisse au moment où l'on vient mettre le doigt sur l'une d'elles.

Jusque-là toutes les touches produiraient le même effet, il faut arriver à les différencier et à imprimer à chacune un caractère propre; M. Froment y parvient de la manière suivante : sur l'arbre d'acier *aa* sont plantés autant de bras qu'il y a de touches, c'est-à-dire 28; ces bras *b* (Fig. 3), tous égaux et perpendiculaires, divisent en 28 parties égales la longueur de l'arbre comprise entre la première et la dernière touche, ils divisent de même sa circonférence en 28 parties égales, formant ainsi la révolution complète d'une hélice, dont une moitié seulement est représentée sur la coupe transversale (Fig. 3). De plus, chaque touche *t* (Fig. 2, 5), porte, au mileu de son épaisseur et dans le point convenable de sa longueur, une cheville d'arrêt *i*, sous laquelle le bras correspondant de l'arbre d'acier passe librement quand la touche est dans sa position naturelle, mais contre laquelle il vient heurter et s'arrêter quand la touche est abaissée

et pressée par le doigt. On vient, par exemple, presser la touche F, à l'instant l'arbre tourne jusqu'à ce que le bras correspondant à cette lettre vienne rencontrer sa cheville d'arrêt; là le mouvement de rotation cesse, et il ne reprend pas quand on lève le doigt, parce que le cliquet s'engage dans la roue r; on passe à la touche R, nouvelle rotation proportionnée à l'intervalle qu'il y a entre F et R, c'est-à-dire de $\frac{1}{28}$ de circonférence pour chaque lettre, et par conséquent de $\frac{11}{28}$ de circonférence; puis nouvel arrêt, et ainsi de suite.

Il ne reste plus qu'une question à résoudre, celle de savoir comment la main, en passant d'une touche à l'autre, détermine le nombre voulu de fermetures et de ruptures de circuit, pour que l'aiguille du récepteur marque tous les signes qui lui sont en quelque sorte dictés par les mouvements de la main. Cette question est résolue de la manière la plus simple : l'autre extrémité de l'arbre d'acier, celle de gauche (Fig. 1), porte une roue analogue à celle des manipulateurs (Pl. 26, Fig. 2 et 5), seulement son pourtour contient 14 dents et 14 espaces vides, parce que le clavier a 28 touches; le contact du ressort et d'une dent produit la fermeture du circuit, tandis que le passage d'un vide devant la saillie du ressort produit la rupture. Alors on comprend que l'aiguillè du récepteur étant sur le final +, il faut, pour que le clavier soit d'acord, que le bras de l'arbre d'acier qui correspond à la touche marquée du final +, soit précisément sous sa cheville d'arrêt; les bras correspondant aux lettres *a*, *b*, *c*, *d*, etc., se trouvent ainsi respectivement à des distances de leur arrêt de $\frac{1}{28}$, $\frac{2}{28}$, $\frac{3}{28}$, etc., de circonférence; donc, si l'on presse une touche quelconque, on déterminera juste la rotation voulue pour que l'aiguille du récepteur vienne s'arrêter sur la lettre correspondant à cette touche, et le même accord se soutient ainsi indéfiniment. On peut l'éprouver par une expérience curieuse : passez la main d'un bout du clavier à l'autre d'une manière quelconque, autant de fois que vous voudrez, aussi vite que vous voudrez, sans ordre ni attention aucune, pressant même plusieurs touches à la fois, le récepteur et le clavier n'auront pas perdu leur accord; en mettant le doigt sur une touche, vous verrez l'aiguille du récepteur marquer cette lettre, comme si l'on venait de régler l'appareil.

Il y avait cependant quelques difficultés, soit pour les lettres doubles, soit pour d'autres détails; mais M. Froment a trouvé

des solutions simples à toutes ces petites difficultés, et son appareil à clavier tel qu'il est aujourd'hui, est, dans le système des télégraphes à cadran, celui qui me paraît mériter le plus de confiance.

Télégraphe à cadran de M. Siemens. — Pour faire connaître cet appareil dont je n'ai pas pu reproduire ici les dessins, j'emprunterai quelques pages du rapport que j'ai été chargé d'en faire à l'Académie des sciences en 1850. (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. XXX, p. 500.)

« Tous les télégraphes alphabétiques construits antérieurement à M. Siemens ressemblent à celui que nous venons de décrire » (c'est-à-dire au télégraphe à cadran ordinaire qui commence cet article, Fig. 5, 6); « on peut les caractériser d'une manière générale en disant qu'ils ont nécessairement un manipulateur qui se meut à la main par celui qui envoie la dépêche, et que, par suite, celui qui reçoit la dépêche est obligé de se taire et de rester passif jusqu'à ce que son correspondant lui laisse la liberté de parler à son tour; que si les divers appareils dont on a fait usage présentent entre eux quelques différences, elles ne portent pas sur ces deux points, mais seulement sur le mécanisme qui sert à transformer le mouvement de va-et-vient en mouvement de rotation, ou sur la disposition du cadran, ou sur la forme de l'interrupteur, ou enfin sur le nombre des divisions tant conductrices que non conductrices dont il se compose.

« M. Siemens a considéré sous un tout autre aspect le problème du télégraphe alphabétique, et il est entré dans une voie tout à fait nouvelle, en se proposant de maintenir à l'opérateur qui reçoit la dépêche, pendant même qu'il la reçoit et qu'il l'écrit, son action directe et immédiate sur l'opérateur qui la lui envoie, et cela sans avoir recours à un second fil, sans rompre l'accord des cadrans et des appareils, et sans amener la moindre perturbation dans la série des signes dont la transmission est commencée.

« La méthode ordinaire refuse absolument cet avantage à celui qui reçoit la dépêche; car, s'il voulait parler pendant qu'on lui parle, il en résulterait à coup sûr une confusion dont on aurait peine à sortir. S'il voit son appareil se déranger, faire un signe pour un autre et répéter toute autre chose que ce qu'on lui dit, il n'a qu'un seul moyen à sa disposition, c'est de rompre le circuit, c'est-à-dire de couper la parole à son correspondant.

Alors ce n'est qu'après des pourparlers et des pertes de temps considérables que la dépêche peut être reprise.

« Par la méthode de M. Siemens, celui qui reçoit la dépêche peut au contraire, à chaque instant et sans aucun trouble, parler à celui qui la lui donne, signaler une erreur, ou demander la répétition d'un signe mal fait ou mal compris.

« Pour réaliser cet avantage, qui est d'une haute importance, M. Siemens supprime tout à fait l'interrupteur dont nous avons parlé, et il dispose son appareil à cadran pour qu'il agisse absolument de la même manière, soit qu'il doive envoyer une dépêche, soit qu'il doive la recevoir. Essayons de faire comprendre ce mécanisme ingénieux qui fonctionne en même temps avec une grande vitesse et avec une régularité parfaite.

« L'armature de l'électro-aimant porte un levier d'environ 1 décimètre de longueur qui exerce deux actions très-différentes.

« Par la première, il fait passer, à chaque vibration double (aller et retour), une dent de la roue sur l'axe de laquelle est montée l'aiguille indicatrice du cadran, et par conséquent il porte cette aiguille d'une lettre à la lettre qui suit.

« Par la seconde action, il rompt le circuit et arrête le courant dont il a lui-même reçu le mouvement; mais il ne l'arrête qu'au moment où il est lui-même arrêté par un buttoir dans son excursion *d'aller*, c'est-à-dire quand l'armature, attirée par l'électro-aimant, est venue aussi près des pôles qu'elle doit le faire; alors le circuit étant rompu, l'armature cesse d'être attirée, et se trouvant immédiatement rappelé par son ressort, le levier accomplit son *retour*. A peine touche-t-il à cette autre limite de son excursion, qu'il complète de nouveau le circuit, rétablit le courant, et à l'instant se trouve de nouveau emporté par l'armature pour accomplir son deuxième aller, qui, par la même cause, est suivi d'un deuxième retour. Ces vibrations isochrones s'accompliraient ainsi indéfiniment tant que la pile fournirait un courant de même intensité; puis, elles deviendraient plus lentes quand la pile s'affaiblirait, et enfin elles cesseraient après un temps plus ou moins long quand l'action du courant serait devenue trop faible pour que la force attractive de l'électro-aimant pût vaincre l'inertie de l'armature et la tension du ressort qui la retient éloignée des pôles[1].

[1] En 1843, M. de La Rive augmentait l'action chimique d'un simple é-

« Deux appareils semblables introduits dans le circuit; l'un à Berlin, l'autre à Paris, marcheraient de pair et avec un synchronisme parfait, sauf la vitesse de l'électricité qui peut ici être négligée; et s'ils étaient d'accord au premier instant, c'est-à-dire si les aiguilles correspondaient au même signe, elles feraient des milliers de tours et marcheraient pendant des journées ou des années entières en se trouvant toujours d'accord, c'est-à-dire toujours au même instant vis-à-vis des mêmes signes.

« Aucun opérateur n'est nécessaire; la pile se charge de tout.

« Cependant, jusque-là, l'aiguille indicatrice du cadran n'aurait qu'un mouvement régulier et saccadé analogue à celui de l'aiguille à secondes d'une pendule; cependant il serait bien plus rapide, car l'aiguille indicatrice pourrait faire une révolution entière par seconde, ne mettant qu'un trentième de seconde pour passer d'un signe du cadran au signe suivant, ce qui suppose, dans le levier de l'armature, trente vibrations doubles par seconde. Il est vrai que M. Siemens n'essaye ses appareils qu'avec une vitesse moitié de celle-ci, c'est-à-dire un tour en deux secondes, ou une vibration double du levier de l'armature en un quinzième de seconde. Cela ne veut pas dire toutefois que son télégraphe puisse faire 15 signes par seconde ou 900 par minute, car l'œil pourrait à peine suivre l'aiguille; d'ailleurs, avec cette vitesse régulière et uniformément saccadée, elle montre tous les signes également, et fait en dernier résultat la même chose que si elle n'en montrait aucun, puisque l'observateur qui la suit ne peut rien distinguer, rien démêler dans ses mouvements : elle fait à peu près comme quelqu'un qui réciterait l'alphabet plusieurs fois de suite, d'une voix parfaitement réglée et monotone, sans faire sentir aucune lettre en particulier; à coup sûr il serait bien impossible de démêler ce qu'il a voulu dire.

« Il faut donc ajouter quelque chose au mécanisme dont nous venons de parler; il faut arrêter l'aiguille dans sa course, non pas longtemps, mais pendant une demi-seconde, un tiers de se-

ment, en introduisant dans le circuit un électro-aimant dont l'armature, par ses vibrations lentes, déterminait des ruptures successives. En 1846, M. Froment, appliquant le même principe sous une autre forme, faisait vibrer l'armature d'un électro-aimant avec une vitesse assez grande pour produire des sons et même des sons très-aigus (*Comptes rendus*, t. XXIV, p. 128); à la même époque, M. Froment employait ces vibrations comme moteurs, après avoir ajouté à son appareil un mécanisme qui se réglait à volonté et opérait la rupture du circuit à une période quelconque de l'excursion.

conde ou peut-être un quart de seconde, suivant la justesse des mouvements de celui qui envoie la dépêche, et le coup d'œil plus ou moins prompt de celui qui la reçoit : par là l'aiguille montre, choisit, ou, si l'on veut, prononce en quelque sorte les lettres sur lesquelles l'opérateur doit exclusivement porter son attention. Pour obtenir ce résultat, M. Siemens adapte circulairement autour de son cadran autant de touches qu'il porte de signes, et sur chaque touche est répété, en caractère très-apparent, le signe auquel elle correspond. En posant le doigt sur une touche, on abaisse une petite tige verticale de 1 ou 2 millimètres de diamètre, qui vient alors barrer le passage à un levier horizontal parallèle à l'aiguille et monté sur son axe. C'est exactement comme si l'on arrêtait l'aiguille elle-même; mais le mécanisme est caché au-dessous du cadran pour n'en pas troubler l'aspect, et pour ne pas fatiguer l'attention de l'opérateur. Il ne suffit pas que l'aiguille soit bien fidèlement arrêtée vis-à-vis du signe qu'elle doit indiquer, il importe de plus que le levier moteur, lié à l'armature, dont le même obstacle arrête aussi la vibration, se trouve alors vers le milieu de son retour, c'est-à-dire vers le milieu de l'excursion qu'il fait sous l'influence du ressort qui le rappelle. On comprend, en effet, qu'à cet instant le circuit étant rompu depuis un certain temps, et les effets du courant ayant cessé, il y a moins de chance pour que l'armature contracte une polarité magnétique capable de troubler la marche régulière de l'appareil. Ces conditions sont très-habilement remplies par M. de Siemens.

« Celui qui envoie la dépêche n'a donc qu'une seule opération à faire ; poser le doigt successivement sur toutes les touches qui correspondent à la série des signes qu'il veut transmettre. Il abaisse une touche, et l'aiguille indicatrice de son appareil, emportée par le mouvement régulier qui l'anime, n'éprouve rien encore; elle continue sa marche jusqu'à l'instant où elle arrive au signe dont la touche est abaissée; là elle s'arrête. L'aiguille de l'autre station, mue par la même force et soumise au synchronisme, ne peut pas cependant s'arrêter mathématiquement au même instant, car le levier qui la fait mouvoir, rappelé aussi par son ressort, achève forcément son retour, puisqu'il ne rencontre pas, comme son homologue de la première station, un obstacle matériel qui l'arrête; il achève donc son retour, et prend la position où, pour sa part, il complète le circuit et ré-

tablit le courant. Cependant ce qu'il fait là ne peut pas avoir à l'instant même son efficacité, puisque son homologue de la première station est alors retenu en un point où il rompt le circuit. C'est ainsi que l'opérateur qui envoie la dépêche, posant le doigt sur une touche pendant une certaine fraction de seconde, détermine un instant d'arrêt pareil dans l'aiguille de la seconde station; mais, il faut bien le remarquer, les deux aiguilles ne peuvent pas s'arrêter au même instant ; la seconde ne s'arrête qu'après un temps qui équivaut à peu près au quart de la durée d'une vibration complète. Cette circonstance est importante par l'influence qu'elle exerce sur le nombre des signes qui peuvent être transmis dans un temps donné.

« Quand celui qui envoie la dépêche lève le doigt qu'il avait posé sur la première touche pour le porter sur la seconde et faire le deuxième signe, les phénomènes suivants s'accomplissent. Le levier de son appareil, obéissant à l'action du ressort qui le tire, est libre enfin d'achever son retour, et il l'achève en effet. Alors, le circuit étant partout fermé, le courant se rétablit; les armatures des deux stations sont attirées simultanément, et les aiguilles reprennent leur marche concordante jusqu'à l'instant où celle de la première station marque le second signe; l'aiguille de la seconde station le répète à son tour, et les mêmes phénomènes se reproduisent jusqu'à la fin de la dépêche.

« Si tout se passe bien, l'opérateur de la seconde station n'a rien autre chose à faire qu'à suivre d'un œil attentif les mouvements de son aiguille indicatrice, et à écrire ou à dicter les signes qu'elle lui a désignés; si, au contraire, il y a un doute, ou s'il est survenu quelque dérangement, il pose le doigt sur une touche; alors l'aiguille de la première station s'arrête à ce signe, et celui qui envoie la dépêche est prévenu par là que son correspondant veut parler : l'entretien s'engage et les explications s'échangent, et bientôt le travail primitif reprend son cours. On peut dire que c'est une conservation bien ordonnée, entre deux personnes qui veulent s'entendre, chacune ayant une égale liberté de placer son mot à propos.

« L'appareil dont nous venons de donner une idée se suffit à lui-même; il n'a besoin d'aucun auxiliaire, lorsqu'on veut s'en rapporter au manuscrit de l'opérateur, et courir la chance des erreurs qu'il a pu commettre, soit en lisant les mouvements de l'aiguille, soit en écrivant les signes après les avoir lus.

« Mais, pour éviter jusqu'à la possibilité des erreurs de cette espèce, M. Siemens joint au besoin, à son appareil, une imprimerie magnétique qui donne la dépêche aussi bien imprimée qu'elle pourrait l'être par la presse ordinaire. Alors le stationnaire n'a pas à s'en mêler ; il peut se promener pendant que son appareil travaille, et s'il revient au bout de quelques minutes, il trouve une bande de papier sur laquelle sont imprimées avec une grande perfection toutes les lettres de la dépêche ; elles ne sont pas seulement mises à la suite l'une de l'autre, mais les blancs sont observés avec soin, petits entre les lettres et grands entre les mots. Rien n'empêcherait d'y mettre la ponctuation la plus correcte, si elle devenait nécessaire à l'intelligence du texte ; mais, en général, ce serait perdre un temps précieux à faire des signes inutiles.

« Essayons de donner une idée de cet appareil, qui est très-bien conçu et parfaitement exécuté.

« Un axe vertical, en tout semblable à celui qui porte l'aiguille indicatrice du cadran, et prenant un mouvement de rotation par un mécanisme absolument pareil, reçoit, à sa partie supérieure, trente rayons horizontaux disposés dans le même plan et espacés également : chacun de ces rayons, vers son extrémité la plus éloignée de l'axe, c'est-à-dire à 4 ou 5 centimètres de distance, porte en relief assez saillant, et sur sa face supérieure, l'une des lettres du cadran ; ces rayons étant flexibles et faisant ressort, il suffira d'en pousser un de bas en haut contre la bande de papier qui se trouve un peu au-dessus pour qu'il vienne la presser avec plus ou moins de force. Cette bande de papier embrasse, sur un arc d'environ une demi-circonférence, un rouleau à imprimer couvert d'une encre assez ferme. Là où le papier est fortement pressé par le relief de la lettre, il s'imprime nettement ; ailleurs il ne reçoit pas même de taches.

« Mais il reste bien des mouvemenuts à combiner pour remplir fidèlement les deux conditions suivantes, savoir :

« 1° Pour que le rouleau à imprimer, qui doit être immobile au moment où il imprime, tourne d'une quantité convenable et emporte avec lui le papier pour faire un blanc, aussitôt qu'il a reçu la pression d'une lettre, et un blanc plus grand quand il termine un mot ;

« 2° Pour que le marteau qui vient en dessous frapper la lettre, vienne juste au moment où elle s'arrête elle-même, pen-

dant peut-être un tiers ou un quart de seconde, pour recevoir le coup.

« Nous avons déjà dit que les rayons qui portent les lettres en relief se meuvent comme l'aiguille du cadran, c'est-à-dire qu'ils forment eux-mêmes une espèce de cadran tournant, de telle sorte que toutes les lettres en relief viennent tour à tour passer au-dessus du marteau, qui est disposé pour agir de bas en haut, et toujours au même point. Or, à la station qui envoie la dépêche, l'opérateur, mettant le doigt sur une touche, arrête un instant la lettre en relief de la deuxième station, comme il y arrête l'aiguille du cadran, lorsqu'on se sert de l'appareil à cadran; il ne reste donc qu'à faire jouer le marteau pendant cet instant très-court, pour que l'impression soit accomplie.

« C'est un électro-aimant puissant qui est chargé de cet office; il est mis en jeu par une pile particulière ou pile auxiliaire, dont le courant n'entre pas dans le circuit télégraphique. Chaque fois que le levier moteur du télégraphe exécute une vibration pour faire passer une des lettres en relief, il établit une communication entre les pôles de la pile auxiliaire, ou, en d'autres termes, il ferme le circuit de l'électro-aimant d'impression, et cependant celui-ci reste inactif, parce qu'il est construit pour obéir plus lentement à l'action de son courant; mais lorsque le levier moteur s'arrête un instant sous l'action de son ressort, c'est-à-dire à sa limite de retour, afin de répéter le signe que la première station lui fait parvenir, alors l'électro-aimant d'impression reçoit du courant qui le traverse une force assez prolongée pour que sa lourde armature obéisse à l'attraction qu'elle éprouve. Dans ce mouvement elle produit les effets suivants;

« 1° Par un levier un peu long qui fait corps avec elle, elle donne le coup de marteau à la lettre en relief qui l'attendait :

« 2° Par un second levier qui agit un peu plus tardivement sur une roue à rochet, elle fait tourner d'un cran le rouleau imprimeur et la bande de papier qui l'entoure; les précautions sont prises pour que le rouleau se déplace aussi dans le sens longitudinal, et puisse imprimer ainsi par les divers points de sa surface;

« 3° Par un troisième levier, elle vient rompre enfin le circuit de la pile auxiliaire, e anéantir ainsi la puissance qui l'avait attirée; à l'instant, cette lourde armature, ayant pour cette fois terminé son rôle, reprend elle-même sa place, obéissant à l'ac-

tion du ressort qui la sollicite, et qui devient alors prédominante ;

« 4° Par un quatrième levier qui ne fonctionne qu'à la fin de chaque mot, l'armature de l'électro-aimant d'impression fait résonner un timbre, et le stationnaire peut apprécier par là si les appareils conservent leur accord ; ce dernier effet résulte d'une disposition ingénieuse : chaque mot se termine par une touche blanche, et celui des trente rayons qui correspond à cette touche ne porte aucun relief, alors le marteau, qui frappe comme s'il devait imprimer, n'éprouvant pas la résistance due à l'épaisseur du relief, fait une course un peu plus longue, et permet à l'armature dont il fait partie de faire elle-même un peu plus de chemin. C'est par cet excès d'amplitude dans le mouvement que le quatrième levier peut arriver jusqu'au timbre à la fin de chaque mot, et n'y arrive pas quand c'est une lettre qui s'imprime.

« Enfin, M. Siemens joint encore aux appareils précédents un appareil nouveau, qu'il appelle *transmetteur*, et qui est exclusivement destiné à transmettre les dépêches entre deux stations très-éloignées l'une de l'autre. Ce troisième appareil repose encore sur le même principe ; mais, de plus, il présente une application intéressante de la théorie des courants dérivés. Le courant qui circule entre les stations, le courant télégraphique proprement dit, peut être très-faible, parce qu'on ne lui demande presque aucun service ; sa seule fonction est d'ouvrir et de fermer le circuit en temps opportun. Alors les courants des piles de chaque station passant presque exclusivement dans les appareils à signaux, ont toujours assez de puissance pour les faire marcher ; puis, quand leur rôle est fini, le faible courant télégraphique agit à son tour pour préparer l'appareil à exécuter le signe suivant.

« La commission a examiné avec un très-vif intérêt les divers appareils de M. Siemens ; elle y a trouvé partout une parfaite intelligence de la théorie, et, en habile observateur, M. Siemens a su tenir compte de tous les phénomènes si complexes qui se manifestent dans les conducteurs et dans les électro-aimants, surtout quand les actions doivent être d'une très-courte durée.

« Son système, médiocrement exécuté, donnerait sans doute des résultats très-médiocres ; mais bien exécuté, comme il l'est par M. Halske, il nous paraît avoir une incontestable supériorité

sur les appareils du même genre, c'est-à-dire sur les appareils alphabétiques ordinaires, en ce que ceux-ci ne fonctionnent pas avec le même degré de sûreté et de précision. Quant à la vitesse, nous sommes portés à croire que l'appareil de M. Siemens ne le cède non plus à aucun appareil alphabétique; nous regardons même comme probable que les perfectionnements ingénieux, que M. Siemens a apportés dans la construction des électro-aimants, sont propres à lui assurer de l'avantage, surtout lorsqu'on a soin de ne mettre en rapport que des appareils ayant à peu près la même sensibililité relative, et de ne jamais associer deux électro-aimants, dont l'un serait vif et l'autre paresseux. »

341. **Télégraphes à signaux conventionnels.** — Nous comprendrons sous ce titre les télégraphes dans lesquels les signaux résultent ou des diverses positions de l'aiguille du récepteur, ou d'une série de mouvements successifs dont l'ensemble ne compose qu'un seul signe convenu d'avance, une lettre ou une idée. Nous ne trouvons que deux télégraphes dans ce genre, celui de MM. Foy et Breguet, qui est exclusivement employé en France par l'administration, et celui qui est le plus répandu en Angleterre, que nous appellerons télégraphe anglais.

Télégraphe de MM. Foy et Breguet. — Lorsqu'on fit en France les premiers essais de télégraphie électrique sur le chemin de fer de Paris à Rouen, M. Foy, directeur des télégraphes, demanda avec raison que les signes électriques fussent les mêmes que ceux du télégraphe aérien auquel son personnel était habitué; la commission ne vit que des avantages à cette identité dans les signes dont l'usage était consacré depuis un demi-siècle, et dont les vocabulaires étaient arrêtés depuis longtemps; M. Breguet ne tarda pas à trouver une solution très-satisfaisante de ce problème : c'est cette solution que nous allons faire connaître, avec tous les perfectionnements que M. Breguet y a introduits et qu'il a bien voulu me communiquer.

Le télégraphe aérien emploie 49 signaux qui se produisent de la manière suivante : aux deux extrémités d'une longue pièce horizontale *ab* (Pl. 26, Fig. 15), que l'on appelle *régulateur*, se meuvent circulairement deux rayons bien équilibrés *ac* et *bd*, que l'on appelle *indicateurs;* chacun de ces indicateurs prend 8 positions, savoir : 2 sur le régulateur, l'une en se repliant sur lui, l'autre en se développant sur son prolongement; 3 au-dessus, la position verticale en haut et les deux positions de 45° à

droite et à gauche de cette verticale supérieure ; 3 au-dessous, la position verticale en bas, et les deux positions de 45° à droite et à gauche de cette verticale inférieure. Que l'un des indicateurs reste immobile, tandis que l'autre prend successivement ses 8 positions, il en résulte 8 signes différents ; et en combinant chacune des 8 positions de l'un avec les 8 positions de l'autre, on obtient en somme 64 signes. Cependant, comme en regardant de loin avec une lunette on aurait pu confondre l'indicateur replié sur le régulateur, avec l'indicateur développé sur son prolongement, il avait été nécessaire de supprimer une de ces positions, ce qui réduisait l'ensemble des signes à 7 fois 7 ou 49.

Dans la télégraphie électrique on donne à chaque indicateur ses 8 positions, ce qui s'obtient avec une sûreté parfaite au moyen de l'échappement de M. Breguet, que nous avons décrit en parlant de son télégraphe à cadran. En effet, il y avait là 26 positions à donner à l'aiguille du récepteur, et l'on avait pris une roue à 13 dents ; puisqu'il n'y a ici que 8 positions à lui donner, il suffira de prendre une roue à 4 dents, et d'employer exactement le même mécanisme. C'est ce qui est représenté dans la figure 15, où l'on voit pour chaque indicateur les deux palettes x et y, une portion de l'arbre oscillant qui les porte et la roue à 4 dents qui fait passer juste une demi-dent ou $\frac{1}{8}$ de circonférence quand l'oscillation du levier dégage une des palettes pour mettre l'autre en prise. Seulement le système est double ; comme il y a deux indicateurs qui doivent se mouvoir, d'une manière parfaitement distincte et indépendante, chacun a son mouvement d'horlogerie, son échappement, son électro-aimant et son courant séparé.

L'ensemble de ce récepteur est représenté dans les figures 12 et 13 ; sur la figure 12 on voit l'apparence extérieure, la forme de la boîte, et celle de ses faces qui est tournée vers l'opérateur, portant en haut, à droite et à gauche, deux petits cadrans qui servent à régler la tension du ressort de l'armature de chaque électro-aimant ; puis, un peu plus bas, le régulateur fixe et les deux indicateurs, dont chacun est monté sur l'axe de la roue à 4 dents des figures 15 et 13, afin de se mouvoir avec elle.

Dans la figure 13, qui est sur une plus grande échelle, la boîte est enlevée, et l'on a la perspective de tout le mécanisme intérieur ; le spectateur est supposé regarder obliquement et par derrière. Dans le système de gauche, on voit l'électro-

aimant horizontal, disposé de manière à pouvoir être facilement enlevé et remplacé; l'armature *t* est en grande partie cachée; mais son levier *gi* s'élève verticalement pour venir en *i* imprimer le petit mouvement d'oscillation à l'axe qui porte les palettes d'échappement *x*, *y*; ces palettes sont elles-mêmes cachées par la platine qui reste en place pour montrer l'ensemble du mouvement d'horlogerie destiné à faire marcher la roue d'échappement.

Dans le système de droite, l'électro-aimant est enlevé pour laisser voir la place qu'il occupe et diverses pièces importantes; la platine du mouvement d'horlogerie est pareillement enlevée, afin de mettre à découvert les rouages qui le composent; ici l'on distingue tous les détails de la roue d'échappement à 4 dents, et de ses rapports avec les deux palettes *x*, *y*, avec l'axe oscillant qui les porte, enfin avec le levier *gi* de l'armature mobile *t* de l'électro-aimant; on voit de plus l'ensemble des communications électriques, dont il sera facile de se rendre compte d'après les développements que nous avons déjà donnés.

Tel est le récepteur de M. Breguet; c'est une véritable pièce d'horlogerie, composée avec cet art dont il a le secret au plus haut degré et exécutée avec les derniers soins de précision, comme tout ce qui sort de ses ateliers.

Arrivons maintenant au manipulateur, qui doit évidemment être double comme le récepteur; il est représenté dans son ensemble et dans sa position (Fig. 12); l'une des manettes est représentée plus en grand et vue de face (Fig. 14); on voit ici, sur le cercle fixe *a*, les huit encoches correspondant aux huit positions de l'indicateur. Que l'on prenne d'une main la manette *m* qui est articulée à son extrémité, qu'on l'éloigne un peu du cercle *a*, et qu'on la tourne pour la porter dans l'une des huit encoches où elle s'arrête par une cheville qu'elle porte, l'indicateur qu'elle fait marcher tourne comme elle et s'arrête avec elle dans la même position. Ce que nous venons de dire de la manette de droite s'applique à celle de gauche, qui agit de son côté de la même manière sur l'indicateur qui est sous son influence. Ainsi les deux mains sont à l'œuvre; mais après quelque temps d'exercice, elles acquièrent une habileté merveilleuse dans ce genre d'opération, où elles doivent perdre toute habitude de mouvements symétriques.

Pourquoi l'aiguille de l'indicateur est-elle obligée d'obéir à la

manette qui la commande, et de la suivre sans cesse dans ses mouvements, dans ses pauses, dans ses vitesses, comme si elles ne faisaient qu'une seule pièce ou comme si elles étaient enchaînées par des liens invisibles? Elles sont liées, en effet, par l'action du courant et par les fermetures et ruptures que la manette détermine : on voit (Fig. 12) un disque métallique *d* qui est monté sur l'extrémité de l'axe horizontal de chaque manette *m* et qui tourne avec elle : il porte une rainure quadrangulaire à angles arrondis qui est vue en projection derrière le disque *a* (Fig. 14); un levier horizontal *z*, placé au-dessous de l'axe de la manette (Fig. 12), porte deux bras, l'un oblique et ascendant qui va par un petit galet engager son extrémité dans la rainure, l'autre vertical et descendant *c* dont l'extrémité, qu'on appelle le marteau, aboutit vers les deux conducteurs *x* et *y* (Fig. 14); gouverné par la rainure, ce levier oscille pendant le mouvement de rotation de la manette, les milieux des 4 côtés de la rainure portent *c* à gauche et les 4 angles le portent à droite; dans le premier cas il y a, par exemple, fermeture du circuit, dans le second cas rupture. C'est ainsi que les 8 mouvements de la manette donnent à l'aiguille du récepteur ses 8 positions; et, que la manœuvre simultanée des 2 manettes de gauche et de droite fait marcher simultanément les 2 aiguilles de gauche et de droite du récepteur, tant à la station de celui qui envoie la dépêche qu'à la station de celui qui la reçoit; seulement, celui-ci est obligé de mettre et de maintenir son manipulateur hors du circuit pendant tout le temps qu'il écoute et qu'il laisse la parole à son interlocuteur.

Télégraphe anglais. — Ce télégraphe ne fait que deux signaux élémentaires, qu'il faut combiner entre eux pour obtenir autant de signaux composés que la correspondance l'exige; c'est une aiguille verticale *g* (Pl. 27, Fig. 11) qui oscille à droite et à gauche entre deux points d'arrêt, *a*, *a'*, très-rapprochés. La plaque antérieure de la petite caisse qui contient l'appareil porte l'alphabet adopté. On voit que la lettre *c* se fait par 4 vibrations successives vers la gauche; la lettre *p* par 4 vibrations vers la droite; *i* se fait par 3 vibrations à droite, suivies d'une vibration à gauche, et *w* par 3 vibrations à gauche, suivies d'une vibration à droite. En général, les lettres de gauche finissent par un mouvement à gauche, et les lettres de droite par un mouvement à droite; de plus, les petites lignes dans le signe de chaque lettre indiquent les mouvements qui se font les pre-

miers. Ce système transmet jusqu'à 15 mots par minute, ou plus d'une lettre par seconde. On s'étonne que l'œil puisse saisir tant de mouvements si précipités et si peu différents, et qu'il parvienne, par l'usage, à démêler sans peine et sans faute ceux qu'il faut grouper ensemble pour composer une lettre; on ne s'étonne pas moins que la main puisse exécuter ces mouvements avec la mesure convenable, c'est-à-dire en y mêlant, à point, certaines pauses très-courtes, formant une sorte de cadence qui aide singulièrement la lecture.

Le même appareil sert à recevoir les dépêches et à les envoyer. Essayons de faire comprendre le mécanisme ingénieux par lequel il peut tour à tour remplir cette double fonction de récepteur et de manipulateur.

1° *Récepteur*. L'aiguille extérieure qu'on regarde n'est pas celle qui reçoit l'action du courant, mais elle est montée sur le même axe qu'une aiguille intérieure *ab* (Fig. 13), et obéit à tous les mouvements que celle-ci est obligée de faire. L'aiguille aimantée *ab* est dans un double multiplicateur (Fig. 12, 13), dont le courant parcourt les fils dans le même sens; de telle sorte que la portion de droite et celle de gauche exercent des actions conspirantes pour faire passer l'extrémité *b* de l'aiguille, soit à droite, soit à gauche, suivant que le courant est ascendant ou descendant dans la partie antérieure du multiplicateur. Mais les deux arrêts *a*, *a'* (Fig. 11) de l'aiguille extérieure limitent l'amplitude des excursions; de plus, la position du centre de gravité maintient le système des aiguilles dans la verticale, quand le courant ne passe pas. Il suffit donc, pour recevoir la dépêche, de mettre les deux extrémités du fil du multiplicateur en communication avec les deux fils de la ligne télégraphique correspondante. Alors, quand on veut opérer très-vite, il faut deux observateurs, l'un pour lire et dicter la dépêche, l'autre pour l'écrire.

2° *Manipulateur*. Pour envoyer une dépêche, l'opérateur met la main sur la clef *f* (Fig. 11, 14), qu'il tourne un peu à droite ou un peu à gauche dans des limites d'excursions moins restreintes que celles de l'aiguille, mais qui cependant ne dépassent pas 15 ou 20°; alors l'aiguille *g* et l'aiguille semblable de la station qui reçoit la dépêche font à l'instant le même mouvement que la clef. Ainsi, en tournant la main on fait tourner les aiguilles; celles-ci ne font que reproduire instantanément avec fidélité et dans leur ordre tous les mouvements de la main ou de la clef.

Les figures 9, 10, 14 vont nous expliquer ce mécanisme. La clef est montée sur un petit cylindre d'ivoire (Fig. 14) qui pénètre dans l'intérieur de la caisse où se trouve le multiplicateur; là, il reçoit deux anneaux de métal, *n* et *p*, séparés par un intervalle d'ivoire de 4 ou 5 millimètres : nous supposons dans la figure que tout l'appareil est vu d'en haut. L'anneau *n* communique sans cesse avec le pôle négatif de la pile, qui vient s'adapter en *y*, parce que la bande de cuivre *y* se continue par un ressort oblique *r* qui frotte sur *n* par une légère pression; l'anneau *p* communique sans cesse avec le pôle positif de la pile qui vient s'adapter en *x*, au moyen du ressort *r'* pareil au précédent; ainsi, nous pouvons dire que *n* et *p* sont le pôle négatif et le pôle positif de la pile. Deux chevilles d'acier ν et ϖ sont fixées l'une sur *n*, l'autre sur *p*; elles sont diamétralement opposées et jouent le rôle principal pour faire parler le télégraphe; l'action de la première s'exerce sur les ressorts d'acier *g'* et *d'*; celle de la seconde sur les ressorts *d* et *g*; *d* et *d'* sont d'une seule pièce et toujours en communication électrique; il en est de même de *g* et *g'*. Les figures 10 et 9 représentent les coupes verticales de l'appareil, l'une faite par les grands ressorts *g* et *d*, l'autre par les petits ressorts *g'* et *d'*. On voit sur la figure 10 le cylindre d'ivoire, l'anneau *p*, la cheville d'acier ϖ et les deux ressorts, celui de droite *d*, celui de gauche *g*, qui viennent en haut, quand ils sont libres, s'appuyer contre la pièce de métal *c*; jamais ils ne touchent l'anneau *p*; ils ne peuvent communiquer avec lui que par la cheville ϖ, quand elle est dans une position convenable; on voit de même sur la figure 9 le cylindre d'ivoire, l'anneau *n*, la cheville ν et les petits ressorts, celui de droite *d'* et celui de gauche *g'*. Jamais ils ne touchent à l'anneau *n*; ils ne peuvent communiquer avec lui que par la cheville ν, quand elle est dans une position convenable.

Quand la clef est verticale, les chevilles ϖ et ν sont l'une en haut, l'autre en bas; elles ne touchent point leurs ressorts, c'est la position qu'elles doivent avoir quand on reçoit la dépêche; les deux fils de la station qui l'envoient arrivent l'un en *a*, l'autre en *b*; si le courant arrive par *a*, il passe au multiplicateur dont le fil communique en *m* et en *u* par ses deux extrémités; de *u* il passe en *g*, en *c*, en *d* et en *b*, ce qui complète le circuit; il traverse le multiplicateur en sens contraire quand il entre par *b*, puisque alors il va de *b* en *d*, en *c*, en *g*, en *u* dans le multi-

plicateur, d'où il sort par *m* pour arriver en *a* et compléter le circuit.

Quand la clef est tournée à droite, la cheville ϖ presse le ressort de droite *d*, le détache de *c* (Fig. 10), ouvre le circuit en ce point, et en même temps met le ressort *d* en communication avec l'anneau *p*, c'est-à-dire avec le pôle positif de la pile de l'opérateur (Fig. 14); par le même mouvement la cheville ν (Fig. 9) vient presser le ressort *g'* et le mettre en communication avec le pôle négatif de la pile; alors (Fig. 14) le courant passe de *d* en *b* pour gagner le fil de la ligne, arriver au multiplicateur de la station qui reçoit la dépêche, revenir en *a*, en *m* dans le multiplicateur de l'opérateur, d'où il sort eu *u* pour passer en *g'* dans la cheville ν et dans l'anneau *n*, pour compléter le circuit.

Quand la clef est tournée à gauche, c'est le phénomène inverse qui se produit; alors (Fig. 10), c'est le ressort *g* qui est détaché de *c* et mis en communication avec le pôle positif de la pile, tandis que la cheville ν vient presser *d'*; le courant de la pile de l'opérateur va donc de *g* en *u* dans son multiplicateur, d'où il sort en *m*, gagne le fil de la ligne en *a* pour agir en sens contraire sur le multiplicateur de la station qui reçoit la dépêche, revient en *b* et *d'* et par la cheville ν à l'anneau *n*, c'est-à-dire avec le pôle négatif de la pile pour fermer le circuit.

Ainsi l'opérateur, par le mouvement de sa clef, fait passer le courant de sa pile dans un sens ou dans l'autre, pour produire, dans son propre multiplicateur et dans celui de la station qui reçoit la dépêche, la série des mouvements qui sont nécessaires pour figurer, aux deux stations, les lettres, les mots et la dépêche tout entière.

L'appareil que nous venons de décrire est un appareil simple; mais, pour obtenir une plus grande rapidité qui va jusqu'à vingt mots par minute, on emploie un appareil double, c'est-à-dire composé de deux multiplicateurs, deux aiguilles extérieures voisines l'une de l'autre, par conséquent quatre fils et deux clefs. Ces deux systèmes étant indépendants, le signe de chaque lettre se fait par la position relative des deux aiguilles. On a ainsi quatre signes élémentaires, au lieu de deux, pour former tous les signes composés; les mouvements sont moins nombreux pour chaque lettre et la transmission plus rapide : au reste, le mécanisme est exactement le même. Cet appareil double devient alors tout a

fait analogue au télégraphe de M. Breguet, que nous venons de décrire, avec cette différence, à l'avantage de celui-ci, qu'il offre incomparablement moins de chances d'erreur, à cause des positions mieux caractérisées des aiguilles de l'indicateur et des mouvements plus assurés, moins incertains, des manettes du manipulateur.

342. **Télégraphes écrivants.** — Nous comprendrons sous ce titre les télégraphes dans lesquels l'action du courant laisse de son passage des traces ou des empreintes qui peuvent être groupées de manière à former tous les signes ou symboles nécessaires à l'expression de la pensée. Je n'ai pu représenter ici que le télégraphe de cette espèce, que M. Froment a construit, il y a quelques années, sur mes indications, en y apportant des perfectionnements d'exécution qui en font un appareil dont la marche est à la fois très-sûre et très-rapide. J'essayerai, toutefois, de donner une idée des appareils de même genre de M. Morse, de M. Dujardin et de M. Bain.

Télégraphe écrivant de M. Froment. — Il est représenté (Pl. 27, Fig. 5 et 6). Le récepteur d'une station écrit sous la dictée du manipulateur de la station qui envoie la dépêche, et la distance des stations peut ici, comme dans les autres télégraphes, être aussi grande que l'on voudra; la plume qui écrit peut être à cent lieues de celui qui la tient, ou du moins de celui qui la fait agir et qui en gouverne tous les mouvements; elle trace, il est vrai, une écriture mécanique dont les lettres ne ressemblent pas aux lettres ordinaires; mais, pour celui qui en a la clef, cette écriture n'est ni moins claire, ni moins correcte, ni moins facile à lire. M. Froment l'a construit en 1845 d'après mes indications.

Après divers essais de plumes et de pinceaux de diverses espèces, j'ai reconnu que pour tracer les signes ce qu'il y a de meilleur est un crayon ordinaire de mine de plomb, tenu obliquement sur le papier comme on le tiendrait à la main pour bien écrire; ce crayon doit recevoir deux mouvements, celui de haut en bas et de bas en haut ou le mouvement de va-et-vient qui forme le trait, et en outre, un mouvement de rotation autour de son axe, imitant celui qu'on lui donnerait en le tournant entre les doigts pour faire poser successivement tous les côtés de la pointe et pour la maintenir également fine et conique. C'est le levier *ab* de l'armature de l'électro-aimant (Fig. 5) qui est chargé de cette

double fonction : le crayon *c* est fixé sur son extrémité et fait avec lui toutes les vibrations qu'il exécute entre ses deux arrêts, à chaque fermeture et à chaque rupture du circuit; ensuite, le portecrayon qui est de métal est fileté en dehors et se trouve muni vers le haut d'une roue ayant sur sa tranche des dents fines et convenablement taillées pour qu'à chaque mouvement de retour que fait le levier par la tension du ressort, un petit heurtoir fasse tourner cette roue d'une dent. Ainsi, par le seul effet de la vibration le crayon se meut, se taille et s'avance à mesure qu'il s'use.

Il reste une condition à remplir : celle de donner au papier une vitesse convenable proportionnée à la vitesse de vibration de l'armature; car c'est du rapport de ces vitesses que dépend la forme des signes; la vitesse de vibration étant uniforme, par exemple de $\frac{1}{10}$ de seconde, si le papier se déplaçait perpendiculairement d'un décimètre dans le même temps, le crayon ne pourrait tracer qu'une longue courbe sinueuse dont la forme se reproduirait périodiquement à chaque double décimètre, si le déplacement du papier n'est au contraire que d'un demi-millimètre pendant le dixième de seconde d'une vibration simple, le crayon tracera une courbe dentelée analogue à *a* (Fig. 7). Mais il faut distinguer ces dentelures et les grouper pour produire le nombre des signes nécessaires savoir : 26 si l'on veut écrire alphabétiquement, et 49 si l'on veut écrire d'après le vocabulaire de l'administration télégraphique. Or, rien n'est plus facile que cette distinction d'après de petits intervalles de repos du manipulateur, comme on le voit par les signes, *b*, *c*, *d*, *e* (Fig. 7), et comme nous l'expliquerons dans un instant.

Le papier reçoit de diverses manières le mouvement dont nous venons de parler : s'il est en ruban étroit on l'enroule sur un tambour animé d'un mouvement de rotation convenable; s'il est en feuille, comme l'indique la figure 5, on l'enroule sur un cylindre dont l'axe porte un pas de vis, tandis que l'un des supports porte un demi-écrou; alors le mouvement d'horlogerie *h* qui fait tourner le tambour avec la vitesse voulue le fait en même temps avancer, la hauteur du pas de vis réglant la grandeur de l'interligne. La dépêche écrite peut être immédiatement pliée, cachetée et envoyée à son adresse.

Ainsi, celui qui reçoit la dépêche n'a plus rien à faire qu'à ôter le papier écrit pour le remplacer par du papier blanc; toutes

les erreurs de lecture et de transcription sont évitées. Ce système a de plus cet avantage très-grand qu'il n'y a plus de désaccord possible entre le manipulateur et le récepteur, et de tous les appareils dont nous avons parlé il n'y a que le télégraphe anglais qui jouisse aussi de cette propriété. Nous n'avons plus qu'un mot à dire pour expliquer le manipulateur qui est représenté en place (Fig. 5) et à part, vu en dessus (Fig. 6).

C'est un disque tournant qui porte huit petits boutons que l'on peut aller prendre successivement avec la main pour les amener en face d'un bouton fixe de repère *b*; vis-à-vis la place qu'ils occupent, soit en dedans, soit en dehors de leur cercle, sont écrits huit numéros fixes et qui ne tournent pas, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; le bouton n° 1 est toujours celui qui se trouve vis-à-vis le chiffre 1, etc., etc.; sur l'axe de rotation du disque tournant est monté un autre disque dont le pourtour est divisé en huit parties égales, alternativement conductrices et non conductrices; les quatre boutons qui correspondent au milieu des premières sont, par exemple, d'ivoire, et ceux qui correspondent au milieu des dernières sont d'ébène; le ressort qui frotte sur la tranche du disque et qui fait la fermeture du circuit, est placé vis-à-vis le bouton fixe *b*; alors il y a fermeture du circuit, quand c'est un bouton blanc qui est en face de *b*, et rupture, quand c'est un bouton noir; le numéro qui correspond au repère *b* est le numéro zéro, et les autres numéros se suivent en faisant le tour par la droite. Il est bon de ne jamais laisser longtemps l'armature de l'électro-aimant en contact avec lui, on a donc soin de mettre un bouton noir au zéro et de ne jamais terminer un signe complet par un bouton blanc; c'est d'ailleurs un moyen de leur donner plus de symétrie. Ainsi pour faire le signe *b* (Fig. 7) qui se prononce 3, 4, 3, il suffit d'aller prendre d'abord le bouton qui est vis-à-vis le n° 3 pour l'amener au zéro, puis le bouton n° 4 pour l'amener au zéro, puis enfin le bouton n° 3 : puisque la somme est paire, c'est un bouton noir qui se retrouve au 0 pour recommencer le signe suivant. On voit marqué en ligne droite, sur ce signe, le temps qu'on a mis pour porter la main au bouton n° 4 et ensuite au bouton n° 3 : on voit pareillement marqué en ligne droite, mais l'armature et le crayon étant sous l'influence du ressort, le temps qui s'est écoulé pour passer au signe suivant *c*, qui est marqué 5, 2, 1, etc.

Quand un signe se compose de deux mouvements, il est bon de les faire tous deux impairs, comme 1, 1; 1, 3; 1, 5; 1, 7; 3, 1; 3, 3; 3, 5; 3, 7, etc., et quand il se compose de trois mouvements, d'intercaler au milieu un nombre toujours pair, comme 1, 2, 1; 1, 2, 3: 1, 2, 5; 1, 2, 7: 1, 4, 1; 1, 4, 3, etc.: par ce mode on évite les erreurs, et s'il arrive que l'on en commette, on a un moyen de les reconnaître et même le plus souvent de les corriger.

Télégraphe écrivant de M. Morse. — Cet appareil est fort employé aux États-Unis d'Amérique; les signes qu'il produit se composent d'enfoncements successifs faits sur un ruban étroit de papier mince qui passe entre deux rouleaux de bronze avec une vitesse uniforme. Le même appareil peut à la fois dérouler le ruban de papier et l'enrouler à mesure qu'il reçoit la dépêche; c'est un système d'engrenages mus par un poids et réglés par un volant. La pièce qui fait le signe ou les enfoncements successifs, est une sorte de poinçon à pointe mousse, ajusté obliquement à l'extrémité de l'armature de l'électro-aimant; à l'instant où l'armature est attirée, le poinçon vient, avec une obliquité convenable, presser le papier, non pas sur le métal du cylindre de bronze, mais sur une gorge étroite et peu profonde qu'il porte en cet endroit; le papier n'est point percé de part en part, mais comme imprimé en creux d'un côté et en relief de l'autre. On comprend, d'après cela, qu'un tel poinçon ne peut faire autre chose qu'un *point* presque rond s'il agit par un seul coup, ou une *barre* plus ou moins longue s'il agit par une pression plus ou moins prolongée. Entre deux effets du poinçon se trouve une lacune ou un *blanc*. Le point, la barre et le blanc, voilà les trois éléments donnés pour traduire toutes les pensées de l'intelligence. Ajoutons que pour éviter les méprises et aussi pour aller plus vite, on convient de faire toutes les barres de même longueur; il en est autrement des blancs, on en fait de deux sortes, les uns très-brefs, mais tous égaux entre eux pour séparer les diverses parties d'un même signe, les autres, 4 ou 5 fois plus longs pour séparer deux signes consécutifs. L'action se produit ici par une seule touche : l'opérateur l'abaisse pour fermer le circuit, un ressort la relève pour l'ouvrir; le ressort fait les blancs; l'opérateur fait les points et les barres, mais il lui faut une grande habitude et un sentiment bien juste de la mesure du temps pour travailler sans méprise pendant des heures entières.

Le télégraphe de Morse a sur tous les autres, sans exception, l'avantage de n'avoir aucune pièce délicate, tout y est très-solide et très-résistant. — M. Siemens l'a heureusement modifié, surtout en y appliquant son électro-aimant à *fer tournant*, analogue au *relais* qui est décrit plus loin (244 *bis*). Alors les axes de l'électro-aimant sont horizontaux et l'un d'eux devient l'axe de rotation de l'armature qui porte le poinçon; les mouvements de cette armature sont, comme à l'ordinaire, réglés par deux vis.

Il ne faut donc pas s'étonner qu'il y ait aussi dans tous les États de l'Europe, une tendance très-marquée à donner au système Morse une préférence exclusive. On peut donc présumer que son alphabet deviendra prochainement l'alphabet télégraphique universel; c'est pourquoi je vais le rapporter ici; j'y ai groupé les signes dans l'ordre qui m'a paru le plus propre à graver aisément dans sa mémoire, le rapport de leur forme avec leur valeur alphabétique.

Alphabet du télégraphe de Morse.

e	.	*o*	— — —	*ch*	— — — —
t	—	*g*	— — .	*o*	— — — .
i	. .	*d*	— . .	*z*	— — . .
a	. —	*r*	. — .	*b*	— . . .
m	— —	*k*	— . —	*f*	. . — .
n	— .	*h*	. . . .	*l*	. — . .
s	. . .	*v*	. . . —	*q*	— — . —
u	. . —	*ü*	. . —	*y*	— . — —
w	. — —	*j*	. — — —	*a*	. — . —
				c	— . — .
				p	. — — .
				x	— . . —

1	. — — — —	6	— . . . .
2	. . — — —	7	— — . . .
3	. . — —	8	— — — . .
4	. . . . —	9	— — — — .
5	. . . . .	0	— — — — —

Outre ces signes élémentaires il y a ceux de la ponctuation, et de plus les *signes réglementaires* qui pourront sans doute, avec le temps, devenir aussi les mêmes dans tous les pays. Mais ces autres signes sont essentiellement plus complexes et composés, au moins, de cinq mouvements, puisque, sans tenir compte des chiffres, les lettres de l'alphabet comprennent toutes les combinaisons 1 à 1, 2 à 2, 3 à 3 et 4 à 4.

La lecture des dépêches, pour les traduire à leur arrivée, à mesure que le poinçon les écrit, est peut-être le point où le système dont nous parlons laisse le plus à désirer; cette lecture, qui doit être si prompte, est très-difficile, surtout à la lumière de la lampe.

On a fait des efforts pour remédier à cet inconvénient: tout en conservant du système Morse le ruban de papier et la machine qui le met en mouvement, on a supprimé l'électro-aimant et le poinçon pour y substituer la plume de M. Bain, dont nous parlons ci-après, et sa préparation chimique du papier, ou une préparation analogue. Un inspecteur distingué des lignes télégraphiques de France, M. Pouget-Maisonneuve, a dernièrement obtenu, en suivant cette voie, des résultats remarquables. (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, juillet 1855.) Cependant, le poinçon a de tels avantages, par sa simplicité et par la sûreté de son action, que l'on parviendra sans doute à obtenir de lui des marques qui ne laissent rien à désirer.

Télégraphe écrivant de M. Dujardin. — Il a beaucoup d'analogie avec le précédent, seulement, dans l'appareil de M. Dujardin, le papier est sur un tambour pareil à celui qui est représenté (Pl. 27, Fig. 5), la plume est un godet en forme de cône, rempli d'encre et portant, au point le plus bas, une fente étroite par laquelle l'encre s'échappe quand elle touche le papier; ce godet est attaché à l'extrémité du levier de l'armature de l'électro-aimant, qui est ici vertical; ainsi la plume marque seulement pendant que l'armature est en prise, c'est-à-dire pendant le passage du courant.

Télégraphe écrivant de M. Bain. — Nous avons indiqué (**295**) le principe de cet appareil; un grand cercle de papier préparé et humide est posé sur un plateau de métal, une tige mince de fer se meut en spirale sur ce papier; si le courant passait toujours, elle décrirait une spirale bleue et continue; les ruptures du circuit donnent des intervalles ou des blancs qui, combinés avec les traits et les points bleus, forment la série des lettres dont se compose la dépêche. C'est là ce qui constitue le récepteur; tout y est disposé d'une manière très-ingénieuse.

Le tableau suivant contient la série des signes adoptés par M. Bain; on se figurera aisément l'effet qu'ils produisent lorsqu'ils sont rangés en spirale, le cercle intérieur de cette courbe ayant environ 15 centimètres de rayon et le cercle extérieur 30

ou 40 centimètres, les différents plis de la spire étant seulement à 3 ou 4 mille mètres de distance.

Alphabet télégraphique de M. Bain.

A	— .	1,	. — — —
B, P,	. — .	2,	. . — —
C, K, Qu,	. . .	3,	. . . —
D, T,	. . —	4,	— — — .
E,	.	5,	— — . .
F, V, Ph,	— —	6,	— . . .
G,	— — — —	7,	. — — .
H,	. — —	8,	— . . —
I, J, Y,	—	9,	. — . —
L,	— — —	0,	— . — .
M,	— . —		
N,	. . . .		
O, au, eau.	. .		
R,	— — .		
S, Z,	— . .		
U,	— .		
X,	— . — —		
tion, sion,	. — . .		
ance, ence,	— — . —		
ant, ent,	. . — .		

Le manipulateur de M. Bain n'est pas une invention moins intéressante. La dépêche doit être préparée d'avance, elle est écrite à l'*emporte-pièce*, sur un long ruban de papier; c'est-à-dire que ce ruban passe avec une certaine vitesse sous un poinçon qui enlève de petits rectangles transversaux; un seul coup du poinçon correspond à un point, trois ou quatre coups successifs correspondent à un trait, un intervalle plus ou moins grand correspond au blanc qui doit rester entre les traits et les points. Ce ruban forme ainsi une sorte de galerie découpée à jours qui est ensuite confiée au manipulateur. Le reste de l'opération est d'une simplicité parfaite : une petite languette de métal, faisant ressort, touche en haut un disque de bronze mobile autour d'un axe horizontal; ce contact ferme le circuit et laisse passer le courant; le ruban de la dépêche est appliqué sur le disque et passe sous la languette; chaque endroit découpé permet le contact et produit une fermeture du circuit, chaque intervalle au contraire donne une rupture, tout se réduit donc à tourner avec une vitesse uniforme la manivelle qui fait cheminer

le ruban entre la languette et la surface du disque : seulement cette vitesse doit être réglée sur celle qui, à l'autre station, fait mouvoir la plume de fer qui doit produire des traces correspondantes sur le papier cyanuré.

Je dois ajouter qu'ayant eu l'occasion de déchiffrer une dépêche d'une page, transmise de Paris à Paris en passant par Lille et transmise dans ce long circuit à raison de 1100 ou 1200 signes par minute, je n'y ai pas trouvé une seule faute.

Tels sont les divers systèmes télégraphiques qui ont jusqu'à présent mérité quelque attention.

343. Établissement des circuits. — On peut distinguer trois espèces de circuits : les circuits *aériens*, les circuits *souterrains* et les circuits *sous-marins ;* nous allons indiquer rapidement les principales conditions d'après lesquelles ils s'établissent.

Circuits aériens. — Des poteaux de bois solidement plantés sur les bords du chemin de fer, à la distance de 20 ou 30 mètres, soutiennent et isolent le fil, à la hauteur de 2 ou 3 mètres au dessus du sol, et à la hauteur de 7 mètres, soit quand le fil passe d'un bord à l'autre de la voie, soit quand il traverse une route ordinaire. Sur ces poteaux sont fixés des supports isolants, de porcelaine ou de terre cuite, faits en forme de cloches et protégeant ainsi contre la pluie une tige qui descend de leur sommet, en se prolongeant un peu plus bas que les bords, et qui est destinée à porter le fil. De 500 mètres en 500 mètres se trouvent des poteaux plus forts, que l'on appelle *poteaux de traction*, sur lesquels on établit des espèces de treuils isolés, propres à tendre le fil et à prévenir les trop grandes flèches qu'il pourrait faire entre deux poteaux ordinaires s'il était trop lâche. Lorsque le circuit est tout entier métallique, il faut un fil d'aller et un fil de retour, et ces deux fils ne doivent ni se toucher ni communiquer indirectement entre eux ; ils sont portés par les mêmes poteaux, mais leurs supports isolants sont l'un au-dessus de l'autre à une distance de 20 ou 30 centimètres. Dans les appareils doubles il faut quatre fils pour composer les deux circuits distincts qui doivent faire marcher, l'un la portion de droite, l'autre la portion de gauche ; on ajoute souvent des fils supplémentaires, ce qui donne en général sur nos lignes un système de six fils, convenablement espacés sur les poteaux, et dont chacun doit être isolé de ses voisins, comme nous venons de le dire.

Dans la plupart des cas on peut cependant profiter de la con-

ductibilité du sol, et faire la *communication par la terre*, c'est-à-dire prendre la terre pour former l'une des moitiés du circuit; c'est ce que nous allons faire comprendre par un exemple. Supposons en effet qu'entre les deux stations *p* et *r* (Pl. 26, Fig. 7), qui représentent Paris et Rouen, on ait tendu un seul fil *ab*, qu'à Paris le pôle positif de la pile communique avec l'extrémité *a*, et que le pôle négatif plonge dans la Seine, qu'à Rouen l'électro-aimant communique d'une part avec l'extrémité *b*, et de l'autre avec la Seine, il est évident que l'eau du fleuve tiendra lieu de second fil, et que le courant, après s'être propagé de Paris à Rouen par le fil métallique, reviendra de Rouen à Paris en se propageant par l'eau de la Seine qui complétera le circuit, ou *vice versa ;* si c'est le pôle positif de la pile qui plonge dans la Seine et le pôle négatif qui touche au fil, le courant ira par la Seine et reviendra par le fil. Il est vrai que, d'après mes expériences (**289**), la conductibilité du cuivre est environ 2000 millions de fois plus grande que celle de l'eau, et que la section du fil de cuivre n'étant pas 2000 millions de fois plus petite que la section de la Seine, il y aurait du désavantage à substituer la Seine au second fil; mais l'eau de la Seine n'est pas encaissée dans un canal non conducteur, tout au contraire, le canal qui la contient, ou plutôt le sol qui l'environne jusqu'à de très-grandes distances est lui-même humide et conducteur, si bien que l'énorme section du sol fait plus que compenser sa moindre conductibilité, et qu'en définitive le circuit composé d'un fil et du sol donne au courant plus d'intensité que le circuit composé de deux fils. Voilà ce qui était indiqué par la théorie et ce qui a été confirmé par l'expérience. Au reste, on comprend que c'est seulement pour fixer les idées que j'ai parlé de faire communiquer à la Seine la pile de Paris et l'électro-aimant de Rouen; cela n'est nullement nécessaire; il suffit que ces communications se fassent avec un sol humide ou avec l'eau d'un puits, car l'électricité saura bien trouver la liaison, indirecte et cachée pour nous, qui existe entre les puits de Rouen et de Paris et le sol humide du bassin de la Seine.

Quelques physiciens, tout en admettant les explications que je viens de donner, conservent des doutes sur la possibilité d'établir par le sol plusieurs communications télégraphiques voisines, sans danger de confusion; voici les principes d'après les-

quels on peut apprécier dans quel cas ces doutes sont légitimes et dans quel cas ils ne le sont pas. Concevons qu'après avoir arrangé les choses avec un seul fil, comme nous l'avons dit, entre Paris et Rouen, on vienne tendre de l'une à l'autre de ces stations un second fil $a'b'$, pareil au premier, isolé comme lui, et dont les deux extrémités plongent, soit dans la Seine, soit dans les puits qui servent au premier circuit, et examinons quelle part ce second fil doit prendre dans le passage du courant. Nous avons vu (**278**) comment se forment les courants dérivés, et comment, d'après les lois fondamentales qui résultent de mes expériences, on peut déterminer leur intensité; or, s'il arrive que le sol ne conduise pas mieux que le premier fil, la longueur du circuit qu'il représente est égale à la longueur de ce fil, et l'interposition du second fil doublant la conductibilité, l'intensité se partagera en deux parties égales entre lui et le sol; mais s'il arrive que le sol conduise, par exemple, 100 fois mieux que le premier fil, la longueur du circuit qu'il représente n'est plus qu'un centième de la longueur totale du circuit, et la dérivation qui se fait alors entre deux points qui se trouvent *électriquement* si rapprochés ne peut plus prendre qu'une intensité très-faible et comme insensible. C'est d'ailleurs ce qui se détermine rigoureusement par les formules générales que nous avons discutées (**278**), et dans lesquelles il suffit de substituer les données de l'expérience. On voit donc que l'intervention du second fil dépend de la conductibilité du sol, et qu'elle en dépend d'une manière précise et mathématique.

Maintenant concevons que l'on se serve de ce second fil comme du premier, c'est-à-dire qu'il soit en communication avec une deuxième pile et un deuxième électro-aimant, et voyons quand ces deux systèmes télégraphiques différents pourront ou ne pourront pas fonctionner ensemble sans se nuire. Chacun de ces fils faisant à l'égard de l'autre l'office de courant dérivé, chaque pile fera mouvoir les deux électro-aimants : si ces courants dérivés ont une intensité sensible, c'est-à-dire si le sol est trop mauvais conducteur, alors le jeu distinct et simultané des deux systèmes serait impossible; au contraire, il sera très-possible et se fera sans aucune confusion, si le sol est assez bon conducteur pour que les courants dérivés n'aient pas d'intensité sensible. Tout se réduit donc à reconnaître d'avance la conductibilité du sol, et c'est chose facile au moyen des boussoles qui m'ont servi à éta-

blir les lois de l'intensité et qui sont décrites (**284**). Il pourrait bien se rencontrer des sols moins bons conducteurs que le sol de Paris à Rouen; et l'on peut dire *a priori* que cela arrivera dans les pays de montagne, et surtout pour les points qui seront éloignés des grands bassins hydrographiques; mais entre Paris et Lyon, par exemple, la communication paraît devoir être très-bonne, parce qu'elle aurait lieu par la mer Méditerranée, l'Océan et la Manche : il en est de même entre Paris et Saint-Pétersbourg, où elle se ferait par la Seine, la Baltique et la Newa.

Circuits souterrains. — En Allemagne on a préféré les circuits souterrains; les fils sont enterrés sous le sol. Ce mode aurait présenté d'insurmontables difficultés si l'on n'avait eu comme substances isolantes que du verre, du soufre, de la résine, ou même de la soie, de la laine et du coton; les premières sont cassantes et les moindres mouvements du sol auraient déterminé des ruptures, les autres sont perméables à l'humidité et deviennent conductrices; le caoutchouc lui-même aurait présenté de grands inconvénients. Heureusement la gutta-percha, qui a été importée en Europe dans ces dernières années, est venue à point donner une solution du problème; c'est une substance parfaitement isolante, imperméable à l'humidité, résistante, flexible, élastique, se ramolissant à une chaleur de 80°, jouissant alors de la propriété de s'attacher au métal, de faire corps avec lui et de se travailler comme de la cire. Le fil de cuivre ou de fer, d'environ 3 ou 4 millimètres de diamètre, qui doit composer le circuit électrique, est donc enveloppé d'une couche de gutta-percha d'environ 3 millimètres d'épaisseur, formant ainsi avec le métal un cylindre flexible gros comme un fil de caret. Une fois enterrés sous le sol, ces fils ne sont pas cependant à l'abri de toute espèce d'accident; mais M. Siemens a imaginé une série de moyens ingénieux pour découvrir le point où il y a rupture du fil ou de son enveloppe.

Circuits sous-marins. — Il y a aujourd'hui de grands exemples de circuits sous-marins, mais nous parlerons seulement des deux plus anciens : celui de Douvre à Calais et celui de *Holyhead* à *Dublin* entre la côte d'Angleterre et celle d'Irlande. Le premier est représenté (Pl. 26, Fig. 8, 9) : la figure 8 est une coupe d'environ demi-grandeur naturelle et la figure 9 fait voir l'élévation sur une longueur réelle d'environ 10 centimètres. On voit au centre les quatre fils de cuivre avec leur enveloppe de

gutta-percha, puis une enveloppe générale qui les couvre et les unit, et enfin les dix gros fils de fer galvanisé assemblés au pourtour en hélice très-allongée, comme le montre la figure 9; ces fils de fer, inutiles à la communication électrique, sont destinés seulement à protéger les fils conducteurs et leur enveloppe et à donner à l'ensemble une résistance suffisante. Ce grand câble, d'environ 30 kilomètres de longueur, pèse six tonnes par kilomètres ou en somme 180 000 kilogrammes. Sa durée me paraît fort incertaine; sans compter l'effort accidentel qu'il peut avoir à subir de la part des ancres qui viendraient à le rencontrer quand la mer est mauvaise, il faut remarquer qu'entre Douvres et Calais les sondages indiquent de nombreuses crêtes, sur lesquelles le câble doit reposer et qui ne sont pas à une profondeur assez grande pour être à l'abri des violentes agitations de la surface; il est donc à craindre que dans les grandes tempêtes le câble ne se lime sur ces crêtes; de plus, l'action corrosive que l'eau de la mer exerce sur le fer, même sur le fer galvanisé, ne tardera pas à lui ôter une partie considérable de sa résistance; on aurait pu peut-être appliquer ici le mode de préservation de Davy, en adaptant de distance en distance des manchons de zinc qui auraient ajouté leur action efficace à celle de la feuille trop mince qui couvre les fils.

Le câble d'Irlande a une longueur triple, 138 kilomètres; il est construit d'une manière analogue, si ce n'est que l'intérieur ne contient qu'un seul fil de cuivre, tandis que la cuirasse extérieure est composée de 12 fils de fer galvanisé, plus minces que ceux de Douvres; car il pèse dix fois moins à longueur égale, ou seulement 610 kilogrammes par kilomètre et en somme 80 000 kilogrammes. Le projet, la construction et la pose ont été l'affaire de quelques semaines; le fil de cuivre enduit de gutta-percha à Londres, a été transporté près de Newcastle, à Gateshead, dans les ateliers de M. *Newall* qui a fait cette entreprise; là, en peu de jours, il a reçu son enveloppe de fil de fer; chargé sur vingt wagons il a traversé l'Angleterre en quelques heures pour arriver de Newcastle à Maryport, où il a été porté sur *le Britannia*, remorqué par le vapeur *le Prosper*. Un seul jour a suffi pour le dérouler et l'étendre au fond de la mer; la première extrémité ayant été fixée à Holyhead, le 1er juin 1852 au matin, la seconde arrivait le soir à 7 heures à Howth, où le lendemain les communications furent établies avec le rivage et Dublin, qui put im-

médiatement annoncer à Londres le succès de cette audacieuse entreprise si merveilleusement accomplie. (Lettre de M. Gordon à M. Lechatelier, *Bulletin de la société d'encouragement*, juin 1852.)

344. Effets de la foudre et de l'électricité atmosphérique. — Les fils télégraphiques, à raison de leur immense longueur, de leur position élevée et des mauvais conducteurs qui se trouvent sur le sol et autour d'eux, doivent être particulièrement affectés par l'électricité atmosphérique ; il n'est pas nécessaire qu'un nuage soit orageux pour que son action par influence se fasse sentir sur ces fils et y développe des courants plus ou moins intenses. C'est là en effet ce que l'on observe assez souvent ; tantôt la marche des appareils éprouve des perturbations extraordinaires, tantôt ils se mettent d'eux-mêmes en mouvement sous la seule influence des nuages électriques.

Mais dans les temps d'orage ces phénomènes prennent un autre caractère et une autre intensité : on peut en quelque sorte compter les éclairs qui paraissent sur la ligne, par l'agitation subite et violente que les appareils en reçoivent ; et, si la foudre vient à éclater à quelque distance, il est rare que les aiguilles ne deviennent pas elles-mêmes étincelantes par le contre-coup du choc électrique. Enfin, s'il arrive que les fils soient directement frappés, un courant, plus intense que tous ceux que nous pouvons produire, en traverse toute la longueur, se propage dans les fils plus fins des électro-aimants, qui, à raison de leur finesse même, s'en trouvent échauffés, fondus, et quelquefois volatilisés.

On a essayé de prévenir ces accidents, et l'un des appareils qui semblent le mieux réussir est celui que M. Breguet a établi sur nos lignes télégraphiques ; il est représenté (Pl. 26, Fig. 16) ; c'est un fil de fer ou d'acier d'environ 1 décimètre de longueur, plus fin que le fil de cuivre des électro-aimants et fixé dans un tube de verre *t* d'un très-petit diamètre intérieur. Ce fil de fer fait partie de la ligne ; il est établi dans la station, sous les yeux des employés. A raison de sa petite longueur, il ne réduit pas sensiblement l'intensité du courant ordinaire ; il est, par exemple, équivalent à 1 kilomètre du fil de la ligne ; ainsi, sur une linge de 100 kilomètres, il ne réduit l'intensité que d'un centième ; mais, plus mauvais conducteur que le cuivre à section égale, il s'échauffe beaucoup plus ; il entre en fusion et se vola-

tilise avant que le fil de l'électro-aimant soit échauffé d'une manière dommageable. Il arrive assez souvent que le tube de verre est brisé et projeté, on a même vu quelquefois les vis des armatures qui le portent arrachées et lancées au loin.

344 *bis*. **Transmission simultanée des dépêches par le même fil et dans les deux sens opposés.** — On s'est fort occupé depuis quelque temps de résoudre la question suivante : Deux stations télégraphiques peuvent-elles se parler au même instant et par le même fil, sans qu'il en résulte aucune confusion dans les signes? Au premier abord on serait tenté de faire à cette question une réponse parfaitement négative, et cette négation devrait être en effet très-absolue, si elle se rapportait à des circuits disposés comme ils le sont habituellement. Mais plusieurs habiles télégraphistes ne se sont pas arrêtés devant cette impossibilité apparente, et, chose remarquable, ils sont parvenus, presque en même temps, à trouver que la question dont il s'agit peut être résolue affirmativement et qu'elle peut l'être de diverses manières plus ou moins élégantes, théoriquement, et plus ou moins sûres dans la pratique. M. Siemens, dont nous avons parlé p. 781, qui a été des premiers à faire preuve d'une rare habileté dans la construction des appareils télégraphiques, a été pareillement des premiers à s'occuper de la transmission simultanée; ses appareils, dont l'exécution ne laisse rien à désirer, fonctionnent avec un plein succès sous les yeux du public depuis le commencement de l'Exposition, et je vais essayer de faire comprendre les principes sur lesquels ils sont établis.

Le nouveau système pour lequel M. Siemens a des brevets, est un système complet, mais j'en détacherai d'abord, pour la faire connaître, l'une de ses pièces les plus importantes, que l'on ppelle le *relais*, et qui est représentée à part (Pl. 27 A, Fig. 7).

La seule fonction du relais est ici de faire parler à propos l'appareil chargé d'exécuter les signes; car, dans cette combinaison, l'appareil qui fait les signes n'entre jamais dans le circuit général des stations; il a son circuit à part, composé exclusivement de lui-même et de la batterie spéciale qui le met en mouvement. Il faut donc que ce circuit *intra-muros* soit constitué de telle sorte qu'une pièce mobile l'ouvre et le ferme, afin que le courant cesse de passer ou passe de nouveau dans l'exécuteur des signes. C'est là le rôle et le rôle exclusif de l'armature du relais. Dans la nouvelle forme que M. Siemens lui donne,

le relais est un électro-aimant vertical, à deux branches distinctes *a* et *b*, dont la figure 7 représente la vue en dessus : les bobines sont de bois, à bases larges et épaisses, et solidement fixées sur la platine *w*; dans l'axe de chaque bobine passe le cylindre de fer, soit en tube, soit en tige, qui doit être aimanté par le courant; au lieu d'être fixe comme à l'ordinaire, il est porté sur pointe à ses deux extrémités, et peut aisément tourner sur lui-même, non pas pour décrire une circonférence entière, mais seulement une petite portion de circonférence. A chaque bout du cylindre est fixée une armature qui tourne avec lui; la figure ne fait voir que les armatures inférieures de *a* et de *b*; les portions correspondantes *v* et *u* qui doivent agir l'une sur l'autre se regardent par des faces parallèles, et sont distantes seulement de 2 ou 3 millimètres; les armatures supérieures ont la même disposition, et se trouvent à la même distance. Le courant qui passe dans la bobine *a* n'est pas celui qui passe dans la bobine *b*; mais ces deux courants vont toujours dans le même sens, d'où il suit que les deux pôles inférieurs sont toujours de même nom, et les deux pôles supérieurs aussi de même nom entre eux. Cependant, s'il y a entre le courant de *a* et celui de *b* une différence d'intensité suffisante, on comprend que les armatures doivent s'attirer à la fois, en haut et en bas; alors si l'une d'elles a une position fixe, son cylindre ne peut pas tourner, et l'autre cylindre, obéissant à l'attraction qu'éprouvent ses deux armatures, pourra seul prendre un petit mouvement de rotation. L'armature *u* de *b* a un prolongement de bronze *u'* qui va se faire pincer entre deux vis au moyen desquelles on peut l'arrêter et exactement régler sa position; l'armature *v* de *a* est munie d'un prolongement pareil *z*, qui, au lieu d'être pris entre deux arrêts, a la liberté de vibrer de l'un à l'autre. Un ressort *t*, dont la force se gradue à volonté, retient l'armature contre l'arrêt *x* qui est fait de matière isolante; mais aussitôt qu'une attraction assez vive se fait sentir, l'armature est entraînée contre la vis *y* qui est de métal et conductrice. C'est ainsi que le relais ferme le circuit local, car l'une de ses extrémités aboutit en *y* par le fil *q*, tandis que l'autre aboutit à l'armature par le fil *r*, et pendant tout le temps que *z* s'appuie sur *y*, le courant passe au moyen de l'extrémité de l'armature elle-même. Ici on a deux choses à régler, savoir : l'étendue de la vibration, ce qui se fait au moyen de la vis *y*, et aussi la position des deux armatures

mobiles de *a* par rapport aux deux armatures fixes de *b*, ce qui se fait au moyen de la vis *s*, qui déplace dans un sens ou dans l'autre le support commun *s'* de *x* et de *y*.

Ce relais à 4 armatures de M. Siemens me semble être l'une des plus ingénieuses inventions qui aient été faites pour ouvrir et fermer un circuit donné par l'effet d'un courant extérieur, sous la double condition d'avoir de rapides alternatives et de varier cependant la durée, soit de la rupture, soit de la fermeture, surtout si l'on tient compte de l'avantage qu'il a d'agir à volonté par la somme ou par la différence des courants qui traversent les deux bobines; car il suffirait de joindre convenablement les extrémités des fils pour avoir en haut et en bas deux pôles de noms contraires en présence, et par conséquent la somme des actions. Cependant, lorsqu'il s'agit de la transmission simultanée par le même fil, il agit toujours comme instrument différentiel.

La figure 8 représente le dispositif des appareils qui constituent cette double transmission.

A, B, C, D, sont les quatre appareils de la première station S qui occupe la partie inférieure de la planche ;

A', B', C', D', sont les quatre appareils semblables de la deuxième station S' qui occupe la partie supérieure;

l est le fil de la ligne, il peut avoir plusieurs centaines de kilomètres de longueur;

t, t_1, t', t'_1, sont les puits par lesquels A et D de S et A' et D' de S' communiquent avec la terre.

A se compose de la *clef* ou *touche* de bronze *c*, dont l'axe de rotation communique à la terre par le fil 3, de ses deux arrêts *k* et *f*, auxquels aboutissent les deux pôles de la batterie *d*, qui est la batterie de la ligne; au repos, le ressort *g* tient la touche en contact avec *f*; mais il suffit de la presser du doigt pour qu'elle se sépare de *f* et vienne frapper sur *k*.

B est le relais que nous venons de décrire; les mêmes pièces portent les mêmes lettres, seulement nous n'avons désigné ici que celles qui sont indispensables pour faire comprendre la circulation électrique.

C se compose de l'appareil qui exécute les signes, de sa batterie spéciale *h*, et de ses deux fils qui vont au relais; c'est en général un appareil du système de Morse, mais il pourrait aussi bien appartenir à un autre système; c'est pour cela qu'il est

simplement représenté ici par un électro-aimant avec son armature.

D est la résistance; c'est un assemblage de bobines chargées de fils très-fins; par le mouvement de l'aiguille *i*, on peut successivement en introduire des longueurs graduées dans le circuit, afin de composer par là une résistance égale à celle de la ligne. La position de l'aiguille sur le cadran divisé dépend donc de la station plus ou moins éloignée avec laquelle on correspond.

Les mêmes lettres avec un accent désignent les mêmes choses pour la station S'.

Voici maintenant le jeu de ces appareils et la circulation électrique qui s'y établit : premièrement, quand une seule station parle et que l'autre écoute; secondement, quand les deux stations parlent à la fois et écoutent à la fois.

Premièrement. La station S envoie une dépêche à la station S' qui la reçoit en silence, c'est-à-dire avec sa clef au repos. Aussitôt que la clef de S a quitté *f* pour venir s'appuyer sur *k*, le circuit de la ligne est fermé, le courant de la batterie *d*, en suivant le fil 1, arrive en *f* où il se bifurque : une portion prend le fil 2, traverse l'électro-aimant *b*, la résistance D, passe dans la terre en t_1, revient en *t*, traverse le fil 3, le long bras de la clef, et arrive en *k*, c'est-à-dire au pôle négatif de la batterie; l'autre portion prend le fil 4, traverse l'électro-aimant *a*, le fil *l* de la ligne, l'électro-aimant *a'*; le fil 5 passe par *f'* dans la clef *c'* et par le fil 6 dans la terre en *t'* pour revenir par *t*, par le fil 3, et par *k* à l'autre pôle de la pile, car il ne faut pas perdre de vue que la clef *c* est séparée de *f*.

Ces deux circuits sont égaux puisque la résistance D a été faite égale à celle de la ligne, et que les résistances de la terre de *t'* en *t*, ou de t_1 en *t*, sont considérées comme insensibles. Il en résulte : 1° que le relais *ab* ne ferme pas le circuit de C, puisque ses deux électro-aimants sont traversés par des courants égaux; ainsi aucun signe ne se fait à la station S; 2° que le relais *a' b'* ferme le circuit de C', et fait parler l'appareil de la station S', puisque *a'* est seul traversé par le courant.

Il est vrai qu'à la rigueur on pourrait dire qu'il passe aussi un courant par *b'*; car le fil continu de *b'* et de D' a l'une de ses extrémités en *f'* et l'autre en *t'*; il touche donc par deux points différents le circuit traversé par le courant de *a* et *a'*; mais la *distance électrique* de ces deux points est insensible;

d'ailleurs si ce courant dérivé était appréciable, il exercerait une action conspirante, puisqu'en traversant b' il aurait une direction contraire.

Ainsi, quand l'une des stations garde le silence, l'autre peut lui parler sans confusion et en toute liberté.

Secondement. Les deux stations parlent à la fois, c'est-à-dire que les deux clefs c, c' sont séparées de f, f', et appuyées sur k, k'; qu'en même temps les deux batteries d, d' sont en activité. Alors, à la station S, se produira d'abord un courant local passant comme tout à l'heure par les fils 1 et 2, par l'électro-aimant b, par la résistance D, arrivant en t_1, pour revenir en t, gagner le fil 3 et l'arrêt k; on peut l'appeler *courant local* parce que son circuit, tout en passant par la terre, s'accomplit dans la station elle-même. Il en sera de même exactement à la station S'. Il reste seulement à voir ce qui se produira dans le grand fil de la ligne; or, il est évident que ce fil continu depuis le point f de la première station jusqu'au point f' de la deuxième est dans ce cas tout à fait pareil à un fil unique, au moyen duquel on va mettre en communication deux circuits fermés très-éloignés ou très-voisins appartenant chacun à une batterie différente; ce fil unique ne peut être traversé que par des courants égaux et contraires, il est donc parfaitement incapable d'exercer une action magnétique quelconque. Il en résulte que les bobines des électro-aimants a, a' en laissent le fer complétement à l'état naturel; mais b et b', aimantés par leurs courants, exercent alors toute leur action pour mettre les relais en mouvement, l'un pour faire parler C, l'autre pour faire parler C'. Alors, il est vrai, chaque station se parle à elle-même, mais elle se dit ce que l'autre lui dirait. Du moment où l'une des clefs aura quitté son arrêt k, pour revenir en f, les phénomènes se passeront comme dans le premier cas.

Ainsi, en définitive, dans la transmission simultanée, jamais le fil de la ligne n'obéit à la fois à deux actions égales et contraires, mais par la disposition des appareils, ces courts moments d'insensibilité, ou plutôt d'inutilité du grand fil unique qui rattache les deux stations l'une à l'autre, se traduisent eux-mêmes à chaque station par un signe qui est précisément celui que le fil devait transmettre à la fois dans les deux sens opposés.

Il résulte cependant des expériences de M. Faraday sur la lenteur relative avec laquelle les courants se propagent dans les

câbles sous-marins, que la transmission simultanée ne pourrait pas s'y faire sans confusion, à moins que les appareils ne fussent manœuvrés avec une lenteur tout à fait exceptionnelle.

Dans ce qui précède, j'ai essayé de simplifier autant que possible les diverses circonvolutions des courants, afin d'en mieux faire saisir l'ensemble. C'est pourquoi je n'ai pas parlé d'un galvanomètre différentiel dont on se sert pour établir l'égalité entre le circuit de la ligne et celui des résistances D et D'; à chaque station il y a un de ces instruments, dont l'un des fils reçoit le courant du fil 1, tandis que l'autre reçoit en sens contraire le courant du fil 2. Il suffit donc de presser la touche pour faire passer le courant, et en même temps de faire mouvoir l'aiguille *i* de la résistance, jusqu'à ce que le galvanomètre reste immobile sous l'influence des deux courants contraires qui le traversent.

§ 2. *Horloges électriques.*

345. Une seule horloge peut, par le courant électrique, faire marcher les aiguilles d'un grand nombre de cadrans. — Quelques mots suffiront pour faire comprendre cette application qui est déjà réalisée en France dans les embarcadères de plusieurs chemins de fer. Le levier de l'armature d'un électro-aimant agit d'une manière directe ou indirecte sur une roue de 720 dents qui porte l'aiguille des minutes d'un cadran d'horloge et qui la fait tourner avec elle; à chaque 5", le courant passe pendant un instant, l'armature est attirée, son levier pousse la roue et la fait avancer d'une dent, 12 dents font 1', les 720 dents font 1 heure ou un tour entier. Le cadran, l'aiguille, sa roue et l'électro-aimant, voilà donc tout le mécanisme de cette horloge d'une nouvelle espèce.

Mais comment le courant peut-il passer exactement à chaque 5"? C'est précisément pour obtenir cet effet qu'il faut une pendule ou une horloge ordinaire; on y adapte une roue supplémentaire qui fait un tour par minute et qui porte 12 dents; un levier léger est disposé pour être soulevé par chaque dent à l'instant de son passage, et le mouvement qu'il en reçoit produit la fermeture du courant pendant $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ de seconde. Ainsi l'aiguille du second cadran, du cadran électrique, reçoit avec la plus exacte fidélité ses 12 impulsions par minute et chemine dans un accord parfait avec l'aiguille de la pendule motrice. Le

second cadran peut être aussi loin que l'on voudra ; bien plus, rien n'empêche d'en disposer un grand nombre sur le même courant, ou sur la même artère électrique, pourvu que ces dérivations diverses soient conformes aux principes que nous avons établis sur les courants dérivés. Un habile horloger, M. Paul Garnier, est l'un des premiers qui aient résolu cette belle question ; il est le seul à ma connaissance qui en ait fait de grandes applications avec un succès complet.

345 *bis*. **Horloge électro-magnétique.** — M. Froment s'est proposé un problème d'une autre nature et d'une autre portée : il s'est proposé de faire une horloge de précision, sans poids ni ressorts, avec la force électro-magnétique pour moteur exclusif; de plus, il demande à son horloge de marquer, au même instant, l'heure, la minute et la seconde exactes, sur plusieurs cadrans ayant les dimensions des grands cadrans d'horloges publiques et très-éloignés les uns des autres. Cette belle pièce de mécanique figure à l'Exposition, tout le monde a pu en apprécier la rigueur et la simplicité. Nous allons donner une idée du principe de sa construction (Pl. 27, a, Fig. 1, 2, 3, 4, 5).

Figure 1. Vue d'ensemble en élévation.

Figure 2. Vue en dessus.

Figure 3. Portion principale de la figure 1 sur une échelle double.

Figures 4 et 5. Vue en élévation et en coupe du mécanisme qui se trouve à chaque cadran, quelle que soit sa distance au régulateur de la figure 1.

ab est le pendule régulateur ; il bat la seconde, il est suspendu comme à l'ordinaire par deux ressorts *r* et *r'* ; les figures 1 et 2 ne laissent voir que le ressort antérieur *r*, pincé par une vis. Ces ressorts font partie du circuit électrique ; ils reçoivent le courant par le fil *c*, ils le communiquent au corps du pendule, et par conséquent à l'extrémité *e* de la vis *ed*. De l'autre côté, à droite, se trouve un électro-aimant *g* à deux branches (Fig. 3), dont la bobine est, par une de ses extrémités, en communication avec le fil *f* (Fig. 1), et par l'autre avec la pièce mobile et libre *h* qui se termine par le poids *i* (Fig. 1 et 2). L'armature *jkl*, mobile autour du point *k*, a sa course réglée par deux vis à son extrémité *l*. Les pôles de la pile arrivent en *p*, *n* (Fig. 1), et le circuit se complète par les fils *m*, *m'* qui s'en vont à une grande distance porter la force motrice à l'aiguille à secondes d'un grand

cadran, au moyen d'un électro-aimant et d'un mécanisme représenté figure 4. Ici m est le prolongement de *m* et m′ celui de *m′*; en suivant la trace de ces fils sur la figure 4, on voit qu'ils forment les deux extrémités de la bobine de l'électro-aimant *g′*, par conséquent *g′* reçoit le courant comme *g* à l'instant même où le circuit de la pile se ferme. C'est là maintenant ce qui nous reste à indiquer.

Le poids mobile *i* repose sur l'extrémité *j* de l'armature de l'électro-aimant *g* (Fig. 1 et 3), du moins quand celle-ci est au repos, parce que *kj*, muni de cette charge, est moins pesant que *kl*; en même temps, il est très-près de la pointe *e* de la vis *ed* qui fait corps avec le balancier, et qui est destinée à venir le prendre là pour le soulever et le porter pendant tout le temps que le pendule est dans sa vibration de gauche. Supposons donc que le pendule ait été écarté à droite de la moitié de son amplitude de vibration, puis abandonné à lui-même; il va descendre comme un balancier ordinaire, mais aussitôt qu'il a dépassé la verticale pour remonter à gauche, la pointe *e* de la vis vient s'appliquer sous le centre du poids *i* et l'emporte avec elle dans son mouvement ascendant. Ce contact ferme le circuit de la pile, le courant passe dans les électro-aimants *g* et *g′*, leurs armatures sont attirées et produisent des effets différents.

Examinons d'abord l'action de *g*; en soulevant *l*, il fait baisser *j* d'une quantité égale, parce que les bras de l'armature sont égaux; si les vis régulatrices permettent que *l* s'élève, par exemple, de 4 millimètres, l'abaisssement de *j* sera aussi de 4^{mm}. Mais le circuit reste fermé pendant la demi-seconde ascendante de la vibration et pendant la demi-seconde descendante; il ne pourra se rouvrir et se rompre qu'à l'instant où le poids *i* viendra rencontrer l'extrémité *j* de l'armature pour s'y reposer; or, puisqu'il la trouve à 4^{mm} au-dessous du point où elle était, il va lui-même descendre plus bas des ces 4^{mm}, et par là donner au pendule l'impulsion juste qui lui est nécessaire pour continuer son mouvement avec une parfaite régularité. Lorsque le poids *i* est repris par *j*, le circuit s'ouvre, l'armature cesse bientôt d'être attirée, elle se remet au repos, relevant ainsi le poids *i* de 4^{mm} longtemps avant que le balancier ne vienne le reprendre de nouveau dans son oscillation ascendante de gauche. Tel est le mécanisme simple et ingénieux par lequel force électro-magnétique remplace sur le pendule l'action des

poids et des ressorts. On voit qu'il est indépendant de l'intensité du courant; seulement il faut qu'au point où se fait la fermeture et la rupture du circuit, les métaux ne s'altèrent pas et ne contractent aucune adhésion nuisible.

Examinons maintenant ce qui se passe derrière le cadran (Fig. 4 et 5). Le même courant qui maintient au balancier son parfait isochronisme, passe en même temps, comme nous l'avons dit, dans l'électro-aimant *g'*. Son armature *qo*, dont le point fixe est en *o*, est attirée par ce mouvement qui s'accomplit à chaque seconde; elle va pousser d'une dent la roue *s* de 60 dents, qui accomplit ainsi sa révolution en 1'. Il y avait ici une difficulté mécanique que M. Froment a, comme à l'ordinaire, très-habilement surmontée : au lieu de faire agir l'armature directement sur la roue *s*, il la fait agir par un système de leviers articulés *t*, *u*, *v*, *x*, qui a l'avantage de remplacer une espèce de choc par une force graduée. Le ressort *y* ajoute encore à la régularité; il sert à la fois de modérateur pour la vitesse, et d'arrêt après le passage de chaque dent.

L'axe de roue *s* porte un pignon qui donne le mouvement à la grande roue *z*; ce système de réduction de vitesse se continue pour arriver enfin au mouvement 60 fois plus lent de l'aiguille des minutes et 60 fois plus lent encore de l'aiguille des heures.

§ 3. *Vitesse de l'électricité.*

346. Les expériences que j'ai faites en 1837, et dont j'ai rapporté un extrait (**291**), (Pl. 22, Fig. 26), donnent une sorte de limite inférieure de la prodigieuse vitesse avec laquelle l'électricité se propage dans un circuit donné. L'expérience que j'ai citée dans ce passage prouve que dans $\frac{1}{2400}$ de seconde un courant se propage avec toute son intensité dans le circuit qui lui est offert; d'autres expériences analogues m'ont démontré que cette propagation intégrale se fait encore dans $\frac{1}{5000}$ et même dans $\frac{1}{7000}$ de seconde. La nature et l'étendue des circuits ne paraissent aucunement modifier ces résultats; que le courant ait à traverser quelques centaines de mètres ou plusieurs milliers de mètres d'un fil métallique, ou plusieurs mètres d'un très-mauvais conducteur, comme une fine colonne d'eau, l'expérience réussit également bien. On ne peut pas avoir *a priori* la certitude absolue que la vitesse de propagation est proportionnelle à la conducti-

bilité du circuit; mais en admettant ce principe comme extrêmement probable, il en résulterait que, dans certains cas du moins, la vitesse de l'électricité est beaucoup plus grande que celle de la lumière, car en admettant seulement en nombres ronds que dans $\frac{1}{6000}$ de seconde le courant parcourt une colonne d'eau d'un mètre, dans le même temps il parcourrait un fil de cuivre de même section que l'eau et de deux mille millions de mètres de longueur, ou de deux millions de kilomètres : ainsi sa vitesse serait environ dix mille fois plus grande que celle de la lumière.

On a fait des expériences sur ce point par d'autres procédés : M. Wheatstone a, par exemple, employé un appareil des plus ingénieux qui peut incontestablement servir à mesurer des intervalles de temps excessivement petits; mais l'usage qu'il a fait de cet appareil pour déterminer la vitesse de l'électricité ne me paraît aucunement atteindre le but. (Voy. t. II, n° 174.)

Plus récemment on a fait de nombreuses recherches sur ce sujet, soit aux États-Unis d'Amérique, soit en France, où MM. Fizeau et Gounelle ont eu l'avantage d'opérer sur de longues lignes télégraphiques, par des méthodes nouvelles et ingénieuses; mais la question ne me semble pas résolue. Je regrette de n'avoir pas eu le loisir de vérifier avec MM. Fizeau et Gounelle dans quelles limites peuvent être fondées les objections qui se sont élevées dans mon esprit sur la parfaite exactitude des procédés dont ils se sont servis.

§ 4. *Vitesse des projectiles.*

347. Il me reste à donner ici en peu de mots une idée de la méthode dont j'ai fait usage pour constater le temps qui s'écoule entre l'instant où le chien du fusil frappe la capsule et l'instant où la balle sort du canon. Dans un fusil d'infanterie, avec une cartouche réglementaire, le temps a été, dans plusieurs expériences, de $\frac{1}{140}$ à $\frac{1}{150}$ de seconde. La même méthode peut aisément servir, comme on le verra, à déterminer le temps qui s'écoule entre deux points donnés de la trajectoire d'un projectile animé d'une très-grande vitesse, comme aussi à déterminer le temps qui s'écoule dans les réactions élastiques. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XIX, décembre 1844.)

Si une aiguille aimantée est en repos et qu'un courant électrique vienne agir vivement sur elle, pendant un temps très-court, par exemple pendant un dixième, un centième ou un

millième de seconde, il pourra résulter, de cette impulsion unique et presque subite, un mouvement de déviation lent et régulier, d'une amplitude déterminée et parfaitement appréciable. Ce mouvement de déviation sera, par sa cause, différent de celui d'un pendule balistique qui reçoit un projectile; mais il lui sera fort analogue par ses effets, car il se transformera, comme celui-ci, en oscillations plus ou moins rapides. Dans ce dernier cas, la déviation primitive dépend de l'établissement du pendule, c'est-à-dire de sa masse, de sa longueur, de son moment d'inertie, etc.; puis de la vitesse et de la masse du projectile; et les oscillations qui en sont la suite, et qui sont produites par l'action de la pesanteur, dépendent elles-mêmes de cette première impulsion. Dans le cas de l'aiguille aimantée, la déviation primitive dépend aussi de l'établissement de l'aiguille, c'est-à-dire de sa masse pondérable, de sa longueur, de son moment d'inertie, de la quantité et de la distribution de son magnétisme libre; puis elle dépend aussi de l'intensité du courant électrique et du temps pendant lequel il a exercé son action; enfin les oscillations qui en sont la suite, et qui sont produites par la force magnétique terrestre, dépendent elles-mêmes de cette première impulsion. Ainsi la masse et la vitesse du projectile sont ici remplacées par l'intensité du courant et par le temps pendant lequel il agit, si bien que la durée de son action peut se déduire de son intensité, pourvu que les conditions relatives à l'aiguille soient complétement connues.

S'il arrive, par conséquent, qu'un courant électrique puisse agir d'une manière régulière et identique à elle-même pendant un instant très-court, tel, par exemple, qu'un millième ou un dix-millième de seconde, et s'il arrive en même temps qu'il puisse, par cette action si prompte, produire, sur un système magnétique convenable, une première impulsion, une déviation primitive assez lente et d'une amplitude assez étendue, rien ne sera plus facile que de déterminer avec exactitude des intervalles de temps qui se comptent par millièmes ou par dix-millièmes de seconde. Pour obtenir de telles mesures au moyen des aiguilles aimantées, tout se réduit donc à ces deux questions essentielles : quelle est la limite de temps nécessaire à un courant pour traverser un circuit donné? quelle est la limite d'amplitude des déviations qu'il peut produire sur le système magnétique le plus impressionnable?

La première question a été examinée dans l'un des mémoires que j'ai présentés à l'Académie en 1837, sur les lois de l'intensité des courants électriques (voy. plus haut); j'avais constaté alors qu'un circuit de plusieurs milliers de mètres de longueur était traversé par le courant dans un espace de temps qui ne s'élevait pas à $\frac{1}{7000}$ de seconde, et que, dans cet instant si rapide, ce n'était pas seulement une partie de l'électricité qui se manifestait dans le circuit, mais que le courant passait intégralement avec toute son intensité. Je ne sache pas que, depuis cette époque, on ait poussé plus loin ce genre de recherches; j'admettrai donc ce résultat comme la limite de ce qui est démontré, mais non pas comme la limite de ce qui peut l'être; je suis porté à croire, au contraire, que dans un temps plus court, l'électricité peut traverser un circuit d'une étendue beaucoup plus considérable. Il serait intéressant de faire des expériences sur ce sujet avec des circuits de trois ou quatre cent mille mètres, comme ceux qui sont employés aux télégraphes électriques; en opérant sur de telles longueurs, on aurait de bien plus grandes facilités pour trouver la limite de vitesse avec laquelle se propage l'électricité, et aussi pour découvrir si cette limite dépend de la longueur absolue des circuits ou de leur degré de conductibilité.

La seconde question n'est pas résolue par la première : de ce que le courant passe intégralement dans $\frac{1}{7000}$ de seconde, et de ce qu'il maintient en équilibre l'aiguille de la boussole d'intensité par son retour périodique à des intervalles aussi rapprochés, il n'en résulte aucunement qu'une seule de ces actions doive imprimer à l'aiguille une déviation sensible et observable. Il fallait donc isoler l'un de ces chocs pour en connaître l'effet. J'y suis parvenu de la manière suivante :

Sur un plateau de verre de 84 centimètres de diamètre est collée une bande d'étain d'un millimètre de largeur, s'étendant comme un rayon de la circonférence vers le centre; là elle communique à une bande circulaire plus large qui entoure l'axe de rotation. Supposons que le plateau tourne à raison d'un tour par seconde, et que les deux extrémités d'un circuit électrique s'appuient par des ressorts, l'une sur la bande centrale qu'il touche toujours, l'autre sur le verre du plateau près de sa circonférence; au moment où la bande d'un millimètre viendra passer sous ce dernier, il y aura communication électrique, et la durée du courant sera justement égale à la durée du passage de la bande,

c'est-à-dire à $\frac{1}{2250}$ de seconde si l'on touche près de la circonférence, à $\frac{1}{1250}$ si l'on touche au milieu du rayon, etc.

Si le plateau fait deux tours, trois tours, quatre tours par seconde, on obtiendra ainsi des passages d'une durée deux, trois ou quatre fois moindre.

Or, en faisant l'expérience, j'ai trouvé qu'une pile ordinaire de Daniell, à six éléments, ayant à traverser un circuit d'environ 40 mètres de fil de cuivre de 1 millimètre, donne un courant assez intense pour que l'action qu'il exerce pendant $\frac{1}{5000}$ de seconde imprime une déviation de 12 degrés à l'aiguille d'un galvanomètre peu sensible; l'aiguille met environ 10 secondes à parcourir cet arc, de telle sorte que l'action rapide des fluides électrique et magnétique, qui s'est exercée pendant $\frac{1}{5000}$ de seconde, se trouve par là transformée en un mouvement cinquante mille fois plus lent, lorsqu'il passe dans la matière pondérable de l'aiguille.

Le galvanomètre de M. Melloni a une sensibilité qui est maintenant connue de tous les physiciens; elle est variable dans les divers appareils; cependant elle peut être prise pour terme de comparaison, lorsqu'il ne s'agit que de donner une idée approximative des effets électriques. L'un de ces instruments donne 15 degrés de déviation lorsqu'on fait agir sur lui, pendant $\frac{1}{5000}$ de seconde, le courant d'un seul élément de Daniell, dont le circuit se compose d'environ 20 mètres de fil de cuivre de 1 millimètre. Ainsi, avec cet instrument, l'on peut apprécier sans peine la dix-millième partie d'une seconde.

On comprend qu'il y a ici à déterminer les lois suivant lesquelles l'amplitude de la déviation varie dans le même appareil, avec l'intensité du courant et la durée du contact. Ces lois peuvent se déduire de diverses considérations théoriques; cependant il sera nécessaire de les vérifier par des expériences précises. En attendant, je me suis borné à graduer empiriquement l'appareil qui m'a servi, c'est-à-dire à dresser une table des déviations qu'il éprouve sous l'influence d'un courant connu agissant pendant un temps déterminé. Cette graduation une fois faite, le galvanomètre devient, en quelque sorte, un pendule balistique qui donne le temps pendant lequel le même courant exerce son action.

Parmi les applications que j'en ai pu faire jusqu'à présent, je citerai seulement celle qui est relative à la vitesse d'inflammation de la poudre.

L'expérience se dispose de la manière suivante (Pl. 27, Fig. 8) : les deux extrémités d'un circuit dans lequel se trouve le galvanomètre et un élément de Daniell viennent s'adapter, l'une à la capsule mise en place sur sa cheminée, et l'autre au chien du fusil, toute la batterie étant bien isolée du canon; une portion du fil passe devant le bout du canon, à quelque distance, de manière à être coupée par la balle à l'instant où elle sort. Voilà tout l'appareil. Lorsqu'on tire, le courant passe donc pendant tout le temps qui s'écoule depuis l'instant où le chien frappe la capsule jusqu'à l'instant où la balle coupe le fil. Les déviations produites dans diverses expériences faites avec la même charge de poudre sont parfaitement concordantes; les observations se font avec la plus grande facilité, et, avec la charge dont j'ai fait usage, les valeurs extrêmes sont $\frac{1}{140}$ et $\frac{1}{150}$ de seconde, pour le temps qui s'écoule entre l'instant où la capsule est frappée et l'instant où la balle sort du canon.

FIN DU TOME PREMIER.

PREMIÈRE ADDITION AU TOME PREMIER.

Froid produit par le passage du courant. — Peltier a constaté par les expériences les plus concluantes un fait remarquable, jusqu'à présent exceptionnel, et qui reste sans explication : on sait que le courant électrique détermine en général une élévation de température dans tous les conducteurs qu'il traverse, quelle que soit leur nature; en conséquence, on admettait implicitement qu'au passage d'un corps dans un autre cette loi ne pouvait manquer de se vérifier. En soumettant cette conclusion à des expériences délicates et précises, Peltier a reconnu d'abord que pour des courants de faible intensité, passant d'un métal dans un autre, les deux métaux étant soudés ensemble, le *sens du courant* a une influence sur l'élévation de température qui résulte de son passage, et qu'en général le degré de chaleur est plus élevé quand le courant passe du corps qui est moins bon conducteur dans celui qui est meilleur conducteur; et il a reconnu ensuite que si les deux métaux soudés sont le bismuth et l'antimoine, au lieu de réchauffement on observe un *refroidissement* considérable quand le courant passe du bismuth à l'antimoine. Ainsi, en disposant deux éléments bismuth et antimoine, *b* et *b'* (Pl. 22, Fig. 23), chacun dans l'une des boules d'un thermoscope, de telle sorte que l'une des soudures se réchauffe et que l'autre se refroidisse par le passage du courant d'une pile, on voit l'index *i* du thermoscope marcher dans un sens ou dans l'autre, suivant la direction du courant.

Peltier a encore constaté ce fait au moyen de sa *pince électrique* (Fig. 22). Cet appareil se compose de deux couples bismuth et antimoine formant pile : le premier de ces éléments *e* est d'un côté de la soudure où l'on veut observer l'effet du courant, et le deuxième *e'* est de l'autre côté; ils sont réunis électriquement par un fil de communication, et de plus joints par un ressort qui les presse. Le courant d'une pile va, par exemple,

du bismuth *b* à l'antimoine *a*, dans le barreau *ab* fixé sur des supports *ss'*; alors les deux soudures de la pince participent au refroidissement que le courant produit par son passage dans ce barreau composé, et cet effet est accusé par un galvanomètre qui est mis en communication avec les fils *f* et *f'*.

DEUXIÈME ADDITION AU TOME PREMIER.

Il me semble nécessaire d'appeler au moins l'attention de mes lecteurs sur les belles expériences de M. Foucault qui ont pour objet de démontrer la rotation de la terre par des phénomènes purement terrestres. Cette question touche à la fois à la physique et aux principes les plus délicats de la mécanique rationnelle; sous ce double rapport j'en donnerai, je crois, une idée assez complète en me bornant à rapporter ici textuellement la communication qui a été faite à l'Académie des sciences, par l'un des géomètres de cette Académie, peu de jours après la présentation des expériences de M. Foucault (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXII, p. 157, 10 janvier 1851). Dans cette note succincte, M. Binet me semble avoir indiqué d'une manière simple et rigoureuse tous les éléments théoriques de ces phénomènes remarquables.

Note sur le mouvement du pendule simple en ayant égard à l'influence de la rotation diurne de la terre, par M. Binet.

« L'Académie a entendu, avec beaucoup d'intérêt, la communication que lui a faite M. Arago d'une belle expérience exécutée par M. Foucault : son objet est de montrer qu'un pendule simple et libre, mis en oscillation dans un plan déterminé, ne conserve pas l'orientation de ce plan, et que, par l'effet de la rotation diurne du globe terrestre, l'azimut du plan oscillatoire s'accroît continuellement dans le sens du nord vers l'est, ou de l'est vers le sud, ou du sud vers l'ouest, ou de l'ouest vers le nord, c'est-à-dire en sens contraire de la rotation du globe.

« L'expérience de M. Foucault réalise aussi un vœu que Laplace énonce dans ces termes : « Quoique la rotation de la terre « soit maintenant établie avec toute la certitude que les sciences « physiques comportent, cependant une preuve directe de ce « phénomène doit intéresser les géomètres et les astronomes. »

« Ce résultat inattendu, qui confirme en quelque sorte physi-

quement les théories de Galilée, a été dignement accueilli et apprécié par les éloges que M. Arago et M. Pouillet ont exprimés dans la dernière séance de l'Académie. Depuis quelques jours plusieurs de nos confrères en avaient connaissance; M. Foucault m'avait exposé une partie des inductions dynamiques et des considérations qui avaient formé sa conviction : de premières expériences avaient justifié ses conjectures et ses vues. En me consultant, l'auteur désirait savoir à quel point le résultat mécanique auquel il arrivait s'accordait avec les théories mathématiques et avec les déductions obtenues par les géomètres. Dans le chapitre v du IV^e volume de la *Mécanique céleste*, Laplace a considéré l'effet de la rotation diurne de la terre sur le mouvement des projectiles dans le vide; il a eu égard, en outre, à la résistance de l'air sur la chute des corps qui tombent d'une grande hauteur : toutefois, il ne s'est pas occupé du pendule à ce point de vue du mouvement du globe terrestre. Poisson a traité ce sujet, en 1837, dans le *Journal de l'École polytechnique;* cependant ce n'était pas l'objet spécial de ce grand géomètre, et il ne s'en occupe qu'incidemment. Il trouve les oscillations indépendantes du mouvement diurne dans tous les azimuts, quand le pendule est assujetti à suivre une courbe donnée; à l'égard du pendule qui peut se mouvoir librement dans tous les sens, il dit que *la force perpendiculaire au plan des oscillations est trop petite pour écarter sensiblement le pendule de son plan et avoir une influence appréciable sur son mouvement*. Cette conclusion paraît contraire aux expériences de M. Foucault; mais le passage que je viens de citer permet un doute : Poisson ne rapporte pas le calcul de la force dont il parle, et d'ailleurs il n'est pas suffisant d'avoir reconnu qu'une force perturbatrice est *très-petite* pour conclure qu'elle ne produira qu'un effet insensible après un grand nombre d'oscillations.

« Cette question méritait d'être approfondie; voici les résultats fournis par une discussion attentive des formules du mouvement relatif, à laquelle je me suis appliqué. J'ai supposé que le pendule ne fait que de très-petites digressions voisines de sa position d'équilibre; quand elles sont planes, une combinaison fort simple et analogue à celle qui donne les équations des moments, montre que le plan oscillatoire tourne graduellement autour de la verticale du point de suspension, avec une vitesse

angulaire constante; l'azimut du plan, mesuré du nord vers l'est, de l'est vers le sud, etc., s'accroît uniformément, la vitesse constante est exprimée par la rotation angulaire de la terre, multipliée par le sinus de la latitude γ du lieu de l'observation. Ce mouvement angulaire est donc $15'' \sin \gamma$, pour une seconde de temps sidéral, la rotation uniforme de la terre étant de 15^o en une heure sidérale. Cette expression de la vitesse azimutale étant obtenue, m'a porté à faire une remarque, fondée sur un théorème d'Euler, que Lagrange a développé dans sa *Mécanique*, et sur lequel la *Théorie des couples*, de M. Poinsot, a répandu beaucoup de clarté. Le théorème d'Euler, appliqué au cas actuel, autorise à regarder la vitesse de rotation de la terre comme la résultante de deux vitesses angulaires qui auraient lieu, l'une autour de la verticale du pendule, et l'autre autour de la méridienne dirigée vers le nord, parce que ces deux lignes et une parallèle à l'axe de la terre passant par la suspension, se trouvent dans un même plan. La composante de la vitesse angulaire, relative à l'axe vertical, a pour expression $n \sin \gamma$, selon ce théorème, c'est-à-dire la rotation de la terre multipliée par le cosinus de l'angle que forme son axe avec la verticale. Cette vitesse angulaire composante est donc la mesure de celle que prend le plan azimutal oscillatoire et en sens contraire. A cette considération, l'on pourrait rattacher quelques inductions et considérations synthétiques pour établir le résultat de M. Foucault; néanmoins il m'a paru qu'une preuve complète et plus satisfaisante résulte des équations du mouvement relatif. Le théorème d'Euler pourrait servir à former les équations différentielles du mouvement; mais elles ne fournissent toutes les circonstances calculables du mouvement que par leur intégration plus ou moins avancée ou par des propositions qui en tiennent lieu. Toutefois, je dois dire qu'au moment où j'énonçai à M. Foucault l'expression de la vitesse, il me montra une formule qui exprimait la même loi; ainsi il a su découvrir non-seulement le phénomène de la déviation du plan, mais aussi la mesure de sa vitesse angulaire autour de la verticale.

« Les oscillations planes du pendule simple sont un cas particulier des oscillations coniques considérées autrefois par Clairaut, et c'est le problème plus général que j'ai effectivement traité, mais en ayant égard à la rotation diurne de la terre. Quand on fait abstraction de ce dernier mouvement et que le

pendule ne s'écarte que très-peu de la verticale, notre confrère M. Pouillet a remarqué, il y a longtemps, que la projection horizontale du point mobile décrit une orbite elliptique dont le centre répond à la verticale, et, en se bornant au premier degré d'approximation, l'ellipse est invariable. En faisant intervenir le mouvement diurne de la terre, je trouve que, quel que soit le sens du mouvement du pendule dans son orbite sphérique, cette projection horizontale est encore une ellipse dont les deux axes sont constants; c'est le plan azimutal du grand axe de l'ellipse qui se déplace, dans un sens rétrograde, avec une vitesse dont la partie uniforme est $n \sin \gamma$, c'est-à-dire la rotation angulaire de la terre estimée parallèlement à l'horizon, ainsi que je l'ai expliqué ci-dessus. Tous ces résultats supposent que l'on néglige la résistance de l'air, dont l'effet principal se manifeste sur l'amplitude et sur la durée des oscillations, que cette résistance finit par éteindre; mais cet effet est très-faible sur la déviation du plan : ce ne sera que dans une seconde approximation que j'essayerai d'y avoir égard, n'ayant pour objet dans cette note que de montrer comment l'expérience importante de M. Foucault aurait pu être indiquée par les équations de la dynamique interprétées sans inadvertance, parce qu'elles ne sont autre chose que l'expression exacte des lois du mouvement de la matière. »

TABLE

DES ÉQUIVALENTS CHIMIQUES,

L'OXYGÈNE ÉTANT REPRÉSENTÉ PAR 100.

SUBSTANCES.	FORMULES.	Équivalents.
ACIDE ACÉTIQUE (dens. 1063)...	$C^4H^4O^4 = C^4H^3O^3 + HO$....	750.00
Acétates..................	$C^4H^3O^3 + RO$.	
Acétates hydratés.............	$C^4H^3O^3 + RO + nHO$.	
ALCOOL......................	$C^4H^6O^2$................	575.00
ALUMINIUM...................	Al..................	171.16
Alumine....................	Al^2O^3.................	642.32
Chlorure d'aluminiun.........	Al^2Cl^3.................	1670.28
Alun potassique..............	$3SO^3,Al^2O^3 + SO^3,KO + 24HO$..........	5962.34
» ammonique.............	$3SO^3,Al^2O^3 + SO^3,AzH^3.HO + 24HO$............	5673.44
AMMONIAQUE................	AzH^3.................	212.50
Sulfate d'ammoniaque.........	SO^3,AzH^3,HO..........	826.16
Azotate —	AzO^5,AzH^3,HO.........	1000.00
Oxalate —	$C^2O^3,AzH^3,HO + HO$.....	887.50
ANTIMOINE...................	Sb..................	1612.90
Oxyde d'antimoine............	SbO^3.................	1912.90
Acide antimonieux............	SbO^4.................	2112.90
Acide antimonique............	SbO^5.................	2112.90
Protochlorure, sulfure, iodure..	$SbCl^3$, S^3, I^3.	
Perchlorure, sulfure..........	$SbCl^5$, S^5.	
ARGENT......................	Ag..................	1351.61
Oxyde d'argent..............	AgO.................	1451.61
Chlorure, sulfure, iodure, cyanure d'argent..............	AgCl, S, I, Cy.	
Azotate d'argent.............	AzO^5AgO..............	2126.61
Sulfate —	SO^3,AgO..............	1952.77
ARSENIC.....................	As..................	940.08
Acide arsénieux..............	AsO^3.................	1240.08
Acide arsénique..............	AsO^5.................	1440.08
Protochlorure, sulfure d'arsenic.	$AsCl^3$, S^3.	
Perchlorure................	$AsCl^5$.	
Arsénites..................	AsO^3,RO.	
Arséniates.................	AsO^5,RO.	
AZOTE......................	Az..................	175.00
Protoxyde d'azote............	AzO.................	275.00
Bioxyde d'azote.............	AzO^2.................	375.00

SUBSTANCES.	FORMULES.	Équivalents.
Acide azoteux.	AzO^3	475.00
— hypoazotique.	AzO^4	575.00
— azotique dans les sels.	AzO^5	675.00
— azotique hydraté.	AzO^5+HO	787.50
Azotites.	AzO^3RO.	
Azotates.	AzO^5,RO.	
BARIUM.	Ba	856.88
Baryte.	BaO	956.88
Bioxyde de barium.	BaO^2	1056.88
Chlorure, sulfure.	$BaCl,S$.	
Sulfate de baryte.	SO^3,BaO	1458.04
Azotate —	AzO^5,BaO	1631.88
Carbonate —	Co^2,BaO	1233.40
Chlorate —	$ClO^5,BaO+HO$	2012.09
BENZOILE.	$C^{14}H^{10}O^2=Bz$	1375.00
Hydrure de benzoïle.	BzH	1387.50
Chlorure.	$BzCl$	1817.65
Acide benzoïque.	BzO,HO	1587.50
Benzamide.	Bz,AzH^2	1575.00
BISMUTH.	Bi	1330.37
Oxyde de bismuth.	Bi^2O^3	2960.75
Chlorure, sulfure, iodure de bismuth.	Bi^2Cl^3, S^3, I^3.	
Azotate de bismuth cristallisé.	$3AzO^5,Bi^2O^3+9HO$.	
BORE.	B	136.20
Acide borique fondu.	BO^3	436.20
— cristallisé.	BO^3+3HO	773.70
Gaz fluoborique.	BFl^3	837.60
Borates.	BO^3,RO	
BROME.	Br	979.02
Acide bromique.	BrO^5	1479.02
— bromhydrique.	BrH	991.52
Bromures (Br remplace O des oxydes).		
CADMIUM.	Cd	696.77
Oxyde de cadmium.	CdO	796.77
Chlorure, sulfure, iodure de cadmium.	$CdCl$, S, I.	
Sulfate de cadmium.	$SO^3,CdO+4HO$	1747.93
CALCIUM.	Ca	256.02
Chaux.	CaO	356.02
Chaux hydratée.	CaO,HO	468.52
Chlorure de calcium.	$CaCl$	798.67
CARBONE.	C	75.00
Oxyde de carbone.	CO	175.00
Acide carbonique.	CO^2	275.00
Acide oxalique anhydre.	C^2O^3	450.00
— desséché.	C^2O^3,HO	562.50
Acide oxalique cristallisé.	$C^2O^3,2HO$	675.00
Carbonates.	$CO^2,RO+nHO$.	

SUBSTANCES.	FORMULES.	Équivalents.
Oxalates	$C^2O^3,RO+nHO$.	
Acide mellitique	C^4O^3	600.00
— croconique	C^5O^4	775.00
Sulfure de carbone	CS^2	477.32
Chlorure de carbone	C^2Cl	592.65
Bichlorure de carbone	C^2Cl^2	1035.30
Iodure de carbone	C^2I	1729.50
Protocarbure d'hydrogène	C^2H^4	200.00
Méthylène	C^2H^2	175.00
Bicarbure d'hydrogène	C^4H^4	350.00
— de l'huile.	C^8H^8	700.00
Cétène	$C^{32}H^{32}$	2800.00
Naphtaline	$C^{20}H^8$	1600.00
Térébène	$C^{20}H^{16}$	1700.00
CÉRIUM	Ce	574.69
Oxyde de cérium	CeO	674.69
Sesquioxyde —	Ce^2O^3	1449.39
CHLORE	Cl	442.65
Acide hypochloreux	ClO	542.65
— chloreux	ClO^3	742.65
— chlorique	ClO^5	942.65
— hyperchlorique	ClO^7	1142.65
— chlorhydrique	ClH	455.15
CHROME	Cr	328.00
Oxyde de chrome (Peligot).	CrO	428.00
Sesquioxyde —	Cr^2O^3	956.00
Acide chromique	CrO^3	628.00
Chlorure de chrome (Peligot)	CrCl	770.00
Sesquichlorure	Cr^2Cl^3	1982.00
Chromates	CrO^3, RO	
COBALT	Co	368.99
Oxyde de cobalt	CoO	468.99
Sesquioxyde de cobalt	Co^2O^3	1037.98
Sulfate de cobalt	$SO^3,CoO+6HO$	1645.03
COLOMBIUM (tantale)	Ta	1153.74
Oxyde de colombium	TaO	1253.74
Sesquioxyde de colombium	Ta^2O^3	2607.43
CUIVRE	Cu	395.69
Oxyde rouge de cuivre	Cu^2O	891.39
Oxyde noir —	CuO	495.69
Sulfate de cuivre cristallisé	$SO^3,CuO+5HO$	1559.35
Chlorure de cuivre	Cu^2Cl	1234.03
Bichlorure —	CuCl	838.34
CYANOGÈNE	$AzC^2=Cy$	325.00
Acide cyanhydrique	$AzC^2H=CyH$	337.50
Sulfocyanogène	AzC^2S^2	727.38
Cyanoferrure d'hydrogène	$CyFe, 2CyH+HO$	1451.70
Cyanoferrure jaune de potassium	$CyFe, 2CyK+3HO$	2631.53
Cyanoferrure rouge —	$Cy^3Fe, 3CyK$	4098.14
ESPRIT DE BOIS	$C^2H^4O^2$	400.00

SUBSTANCES.	FORMULES.	Équivalents.
ÉTAIN	Sn	735.29
Oxyde d'étain	SnO	835.29
Acide stannique	SnO^2	935.29
Chlorure d'étain	$SnCl$	1177.94
Bichlorure d'étain	$SnCl^2$	1620.59
ÉTHER HYDRIQUE	C^4H^5O	462.50
— chlorhydrique	C^4H^5Cl	805.15
— nitreux	AzO^3,C^4H^5O	939.50
— acétique	$C^8H^8O^4$	1100.00
— oxalique	$C^6H^5O^4$	912.15
— benzoïque	$C^{18}H^{10}O^4$	1875.00
— méthylique	C^2H^3O	287.50
FER	Fe	339.20
Protoxyde de fer	FeO	439.20
Sesquioxyde —	Fe^2O^3	978.41
Protochlorure —	$FeCl$	781.85
Sesquichlorure —	Fe^2Cl^3	1003.18
Sulfate de protoxyde de fer	$SO^3,FeO+7HO$	1727.86
FLUOR	Fl	233.80
Acide fluorhydrique	FlH	246.30
GLUCINIUM	G	331.26
Glucine	GO	441.26
HYDROGÈNE	H	12.50
Eau	HO	112.50
Eau oxygénée	HO^2	212.50
IODE	I	1579.50
Acide iodique	IO^5	2079.00
Acide iodhydrique	IH	1592.00
IRIDIUM	Ir	1233.50
Oxyde d'iridium	IrO	1333.50
Sesquioxyde	Ir^2O^3	2767.00
Bioxyde	IrO^2	1433.50
Trioxyde	IrO^3	1533.50
LITHIUM	L	80.37
Lithine	LO	180.37
MAGNÉSIUM	Ma	158.35
Magnésie	MaO	258.35
Chlorure de magnésium	$MaCl$	601.00
Sulfate de magnésie cristallisé	$SO^3,MaO+7HO$	1547.02
MANGANÈSE	Mn	345.88
Oxyde de manganèse	MnO	445.88
Oxyde rouge —	Mn^3O^4	1437.66
Sesquioxyde —	Mn^2O^3	991.77
Acide manganique	MnO^3	645,88
Acide hypermanganique	Mn^2O^7	1391.77
MERCURE	Hg	1265.82
Protoxyde de mercure	Hg^2O	2631.64
Bioxyde —	HgO	1365.82
Protochlorure —	Hg^2Cl	2974.29

SUBSTANCES.	FORMULES.	Equivalents.
Protoiodure —	Hg^2I..................	4111.14
Bichlorure —	HgCl..................	1708.47
Biiodure —	HgI	2845.32
Cyanure —	HgCy..................	1590.82
MOLYBDÈNE..................	Mo..................	598.52
Oxyde de molybdène.........	MoO..................	698.52
Bioxyde —	MoO^2..................	798.52
Acide molybdique............	MoO^3..................	898.52
NICKEL....................	Ni..................	369.67
Oxyde de nickel.............	NiO..................	469.67
Sesquioxyde de nickel........	Ni^2O^3..................	1039.35
OR........................	Au..................	1243.01
Oxyde d'or.................	AuO..................	2586.02
Acide aurique..............	Au^2O^3..................	2786.02
Protochlorure d'or..........	Au^2Cl..................	2928.49
Trichlorure —	Au^2Cl^3..................	3813.97
OSMIUM....................	Os..................	1244.48
Oxyde d'osmium.............	OsO..................	1344.48
Sesquioxyde —	Os^2O^3..................	2788.97
Bioxyde —	OsO^2..................	1444.48
Trioxyde —	OsO^3..................	1544.48
PALLADIUM..................	Pa..................	665.90
Oxyde de palladium..........	PaO..................	765.90
Bioxyde —	PaO^2..................	865.90
PHOSPHORE..................	P..................	392.31
Oxyde de phosphore..........	P^2O..................	884.62
Acide hypophosphoreux.......	PO..................	492.31
— phosphoreux...........	PO^3..................	692.31
— phosphorique..........	PO^5..................	892.31
Hydrure de phosphore solide...	PH..................	404.81
Hydrogène phosphoré.		
PLATINE....................	Pt..................	1233.50
Oxyde de platine............	PtO..................	1333.50
Bioxyde —	PtO^2..................	1433.50
Bichlorure —	$PtCl^2$..................	2118.80
Chlorure double de platine et de potassium..................	$PtCl^2KCl$..................	3051.36
PLOMB......................	Pb..................	1294.50
Sous-oxyde de plomb.........	Pb^2O..................	2689.00
Oxyde —	PbO..................	1394.50
Oxyde puce —	PbO^2..................	1494.50
Minium.....................	$Pb^3O^4 = PbO^2,2PbO$......	4283.50
Chlorure de plomb...........	PbCl..................	1737.15
Carbonate de plomb..........	CO^2,PbO..................	1669.50
Oxalate —	C^2O^3,PbO..................	1844.50
POTASSIUM..................	K..................	489.92
Potasse.....................	KO..................	589.92
Potasse hydratée............	KO+HO..................	702.42
Peroxyde de potassium........	KO^3..................	789.92

SUBSTANCES.	FORMULES.	Équivalents.
Chlorure —	KCl	932.36
Azoture —	AzK^3	1644.75
Azotate de potasse	AzO^5,KO	1264.92
RHODIUM	Rd	651.39
Oxyde de rhodium	RdO	751.39
Sesquioxyde —	Rd^2O^3	1602.70
Chlorure —	RdCl	1094.04
Sesquichlorure —	Rd^2Cl^3	2630.73
SÉLÉNIUM	Se	494.60
SILICIUM	Si	277.31
Acide silicique, quartz	SiO^3	577.31
Chlorure de silicium	$SiCl^3$	1605.26
Fluorure —	$SiFl^3$	378.71
SODIUM	Na	290.89
Soude	NaO	390.89
Chlorure de sodium	NaCl	733.54
Sulfate de soude hydraté	$SO^3,NaO+10HO$	1017.05
SOUFRE	S	201.16
Acide hyposulfureux	SO	301.16
sulfureux	SO^2	401.16
hypo-sulfurique	S^2O^5	902.32
sulfurique anhydre	SO^3	501.16
» cristallisable	$SO^3,2HO$	726.16
STRONTIUM	Sr	587.28
Strontiane	SrO	687.28
Sulfate de strontium	SrS	788.44
TELLURE	Te	801.76
Acide tellureux	TeO^2	1001.76
— tellurique	TeO^3	1101.76
THORINIUM	Th	744.90
Oxyde de thorinium	ThO	844.90
TITANE	Ti	303.66
Acide titanique	TiO^2	503.66
Chlorure de titane	$TiCl^3$	1188.90
TUNGSTÈNE ou WOLFRAM	W	1183.00
Oxyde de tungstène	WO^2	1383.00
Acide tungstique	WO^3	1483.00
URANIUM	U	750.00
Urane (protoxyde) (Peligot)	UO	850.00
Peroxyde d'uranium	U^2O^3	1800.00
VANADIUM	V	856.89
Oxyde de vanadium	VO	956.89
Acide vanadeux	VO^2	1056.89
Acide vanadique	VO^3	1156.89
YTTRIUM	Y	948.61
Yttria	YO	1048.61
ZINC	Zn	403.23
Oxyde de zinc	ZnO	503.23

SUBSTANCES.	FORMULES.	Équivalents.
Chlorure —	ZnCl..................	845.88
Sulfate de zinc anhydre........	SO^3,ZnO...............	1004.39
— hydraté........	SO^3,ZnO+7HO.........	1792.44
ZIRCONIUM....................	Zr.....................	420.12
Zircone.....................	Zr^2O^3.................	1140.25

TABLE DES MATIÈRES

DU PREMIER VOLUME.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

Numéros. Pages.

1. Des phénomènes naturels 1
2. De l'espace 2
3. Du temps 4
4. De la matière et des divers états des corps 4
5. Des forces 6
6. Du repos et du mouvement 8
7. De l'inertie 11

CHAPITRE II.

8. Propriétés générales des corps 13
9. Divisibilité 13
10. Porosité 19
11. Compressibilité 24
12. Élasticité 26
13. Dilatabilité 28

CHAPITRE III.

Équilibre et mouvement.

14. Objet de la statique et de la dynamique 30
15. Comparaison des forces 30
16. Ce qu'on entend par système de forces et par résultante 31
17. Résultante de plusieurs forces dirigées suivant la même ligne 32
18. Résultante de deux forces qui agissent sur le même point 32
19. Décomposition des forces 33
20. Résultante d'un nombre quelconque de forces agissant au même point 33
21. Résultante des forces parallèles 33
22. Des couples 34
23. Levier 34
24. Pression sur le point d'appui du levier 35
25. Levier du 1er, du 2e et du 3e genre 35

Numéros. Pages.
26. Mouvement uniforme. 35
27. Conséquences de l'inertie de la matière..................... 36
28. La transmission du mouvement n'est pas instantanée............ 37
29. Quantité de mouvement.................................. 38
30. Communication du mouvement............................. 39
31. Force centrifuge.. 44
32. Mouvement uniformément accéléré 45
33. Vitesse du mouvement varié en général...................... 45
34. Lois et formules du mouvement uniformément accéléré.......... 46

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

—

CHAPITRE I.

Direction de la pesanteur.

35. Effets généraux de la pesanteur.............................. 47
36. Direction de la pesanteur 49

CHAPITRE II.

Lois de la chute des corps.

37. Chute des corps dans l'air.................................. 53
38. Chute des corps dans le vide.................................. 53
39. Plan incliné de Galilée...................................... 54
40. Machine d'Atwood... 55

CHAPITRE III.

Équilibre des corps pesants.

41. Différence entre la pesanteur et le poids...................... 59
42. Centre de gravité.. 59
43. Equilibre des corps pesants. 62
43 *bis*. Appareils divers, aiguille magique........................ 63
44. Effets moléculaires dont il faut tenir compte dans l'équilibre...... 65
45. Description de la balance.................................... 66
46. Du poids, de la masse et de la densité......................... 68

CHAPITRE IV.

Pendule.

47. Définitions relatives au pendule.............................. 73
48. Lois des oscillations du pendule.............................. 74
49. Intensité de la pesanteur et pendule simple..................... 76

Numéros.		Pages.
50.	Pendule composé	77
51.	Figure de la terre	80
52.	Usage du pendule pour déterminer l'aplatissement de la terre	82
	Tableau des observations	86 et 87
53.	Déviation du fil à plomb par l'attraction des montagnes	83
54.	Densité moyenne de la terre par l'appareil de Cavendish	85

CHAPITRE V.

Hydrostatique.

55.	Objet de l'hydrostatique	88
56.	Principe d'égalité de pression	88
57.	Conditions d'équilibre des liquides pesants	89
58.	Détermination des pressions qui s'exercent sur les parois	92
59.	Pressions évaluées numériquement	96
60.	Centre de pression	98
61.	Équilibre des liquides dans les vases communiquants	98
62.	Du niveau des mers	100
63.	Phénomènes qu'on observe à l'embouchure des fleuves	101

CHAPITRE VI.

Équilibre des gaz.

64.	Notions sur la hauteur de l'atmosphère et sur la constitution des gaz	103
65.	Expérience qui démontre la pesanteur de l'air	103
66.	Expérience qui démontre l'action moléculaire et l'élasticité des gaz	104
67.	Conditions d'équilibre des gaz	106
68.	Pression atmosphérique	108
69.	Mesure de la pression atmosphérique	109
70.	Construction du baromètre	113
71.	Baromètre ordinaire	114
72.	Baromètre à cadran de Jecker	115
73.	Baromètre de Gay-Lussac	115
74.	Baromètre de Fortin	115
75.	Variations du baromètre	116
76.	Hauteurs moyennes du baromètre	117
77.	Variations accidentelles	117
	Tableau	118
78.	Variations horaires	119
79.	Loi de Mariotte	120
80.	Machine pneumatique	124
81.	Machine de compression	129
82.	Pompe de compression	130
83.	Manomètre et mesure de la pression des gaz dans divers appareils	130
84.	Fusil à vent	133

CHAPITRE VII.

Numéros.	Corps flottants.	Pages.
85.	Corps pesants qui s'élèvent dans les fluides	134
86.	Principe d'Archimède	134
87.	Conditions d'équilibre des corps plongés	136
88.	Conditions d'équilibre des corps flottants	139
89.	Montgolfières et aérostats	139

CHAPITRE VIII.

Principes d'hydrodynamique.

	Objet de l'hydrodynamique	143
90.	Conditions de l'écoulement des fluides et théorème de Toricelli	143
91.	Divers moyens d'obtenir une pression constante	145
92.	Vérification expérimentale du théorème de Toricelli	147
93.	Constitution de la veine fluide	149
94.	Des ajutages et de leur influence sur l'écoulement	150
95.	Unité de mesure pour la distribution des eaux	152
96.	Pressions latérales exercées par les liquides en mouvement	152
97.	Réaction produite par l'écoulement des fluides	153
98.	Jets d'eau	154
99.	Effets du choc d'une veine fluide contre un corps solide	155
100.	Effets du choc de deux veines fluides opposées	158
101.	Divers appareils fondés sur les pressions de l'air et des liquides	160
102.	Siphon	161
103.	Fontaine de compression	161
104.	Fontaine intermittente	162
105.	Fontaine de Héron	162
106.	Lampe à gaz hydrogène	163
107.	Pompe aspirante et élévatoire	163
108.	Pompe aspirante et foulante à corps de pompe alésé	164
109.	Pompe aspirante et foulante à piston plongeur	164
110.	Pompe des prêtres	165
111.	Presse hydraulique	166
112.	Bélier hydraulique	167

CHAPITRE IX.

Mouvement des gaz.

113.	Analogie des liquides et des gaz pour l'écoulement	170
114.	Gazomètres	170
115.	Théorie de Bernouilli pour l'écoulement des gaz	171
	Tableau des vitesses du vent	174
116.	Anémomètre de M. Combes	174
117.	Vitesse de l'air rentrant dans le vide	175
118.	Machine soufflante	176
119.	Pressions latérales exercées par les gaz en mouvement	177

LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

NOTIONS GÉNÉRALES.

Numéros.		Pages.
120.	Fluide igné, matière du feu, chaleur, calorique	179
121.	Divisions adoptées dans l'étude du calorique	180
122.	Changement de volume	180
123.	Changement d'état	184
124.	Propagation du calorique	185
125.	Calorimétrie	186

PREMIÈRE PARTIE.

CHANGEMENT DE VOLUME ET CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS.

—

PREMIÈRE SECTION.

Changement de volume.

—

CHAPITRE I.

Dilatation.

126. Construction du thermomètre à mercure 190
127. Formules de dilatation 195
128. Dilatation des corps solides 198
Tableau 203
Idem pour le verre 205
129. Application de la dilatation des solides. — Pendules. — Thermomètres métalliques 206
130. Dilatation des liquides, thermomètres à poids 211
131. Idem. Méthode des thermomètres comparés 217
Tableau 221
132. Dilatation des gaz, principes des appareils 222
133. Coefficients de dilatation 224
Tableau 228
134. Mesure des hautes températures 233
Tableau 236
135. Sympiézomètre 236

CHAPITRE II.

Densité.

136. Unité que l'on adopte pour les densités 239
137. Densité des gaz 239

Numéros.		Pages.
138.	Poids spécifique et composition de l'air	243
139.	Densité des gaz composés	245
	Tableau des densités des fluides élastiques	247
140.	Densité de l'eau distillée	247
	Tableau des densités de l'eau de 0 à 108°	250
141.	Maximum de densité de l'eau de mer et des dissolutions	251
	Tableau	251
142.	Densité des liquides	252
143.	Jaugeages par les pesées	253
144.	Aréomètre	254
145.	Densité des corps solides	256
	Tableau des densités des solides	259
	— des liquides	259
	— des liquides	260

DEUXIÈME SECTION.

Changement d'état des corps.

—

CHAPITRE I.

Fusion et solidification.

146.	Fusion	261
147.	Conditions de la fusion	263
	Tableau des points de fusion	265
148.	Solidification	265

CHAPITRE II.

Vapeurs dans le vide.

149.	Formation des vapeurs dans l'air et dans le vide	274
150.	Maximum de tension ou de force élastique	276
151.	Équilibre de tension dans un espace inégalement chaud	278
152.	Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau	279
	Tableaux	285
153.	Tension des vapeurs des différents liquides	288
154.	Densité de la vapeur d'eau	290
	Tableaux	294
155.	Densité des vapeurs de diverses substances	296
156.	Loi de Mariotte, liquéfaction des gaz	299
157.	Les densités des fluides élastiques n'ont pas d'influence sur leurs mélanges	308

CHAPITRE III.

Ébullition et évaporation.

Numéros. Pages.

158. Formation des vapeurs par simple évaporation et par ébullition ; condition de l'ébullition.... 315
159. Diverses causes qui ont de l'influence sur le point d'ébullition... 316
160. Rapidité de l'ébullition.... 326
161. Phénomènes que présentent les liquides en contact avec les corps très-chauds. — État sphéroïdal.... 326
162. Évaporation et froid produit par l'évaporation.... 328
163. Table des points d'ébullition.... 331

CHAPITRE IV.

Chaudières à vapeur. — Machines à basses et hautes pressions. — Machines locomotives.

§ 1. *Chaudières à vapeur et appareils de sûreté.*

164. Chaudières à vapeur.... 333
165. Appareils de sûreté. — Thermomanomètres. — Manomètre à air libre, à air comprimé, manomètre métallique. — Soupapes de sûreté. — Extraction. — Tube de niveau. — Robinets. — Flotteur-indicateur. — Flotteur d'alarme. — Flotteur extérieur. — Table des épaisseurs d'après l'ordonnance.... 337

§ 2. *Machines fixes, à basses et hautes pressions.*

166. Machine fixe à basse pression. — Cylindre. — Piston. — Balancier. — Bièle. — Manivelle. — Volant. — Définition du cheval-vapeur. — Frein.... 352
167. Distribution.... 359

§ 3. *Machines locomotives.*

168. Machines locomotives.... 370
169. Chaudière et foyer.... 373
170. Prise de vapeur et distribution.... 375
171. Liaison du cadre et de la chaudière.... 379
172. Remarques sur la résistance des convois et sur la limite de puissance des machines.... 380

LIVRE TROISIÈME.

MAGNÉTISME ET ÉLECTRICITÉ.

—

PREMIÈRE SECTION.

Magnétisme.

—

CHAPITRE I.

Action des aimants sur eux-mêmes et sur les corps magnétiques.

Numéros. Pages.

173. Définition de l'aimant et du magnétisme.......................... 383
174. Tout aimant a une ligne moyenne et deux pôles............... 384
175. Les pôles de mêmes noms se repoussent, et les pôles de noms contraires s'attirent.. 387
176. Les actions magnétiques peuvent être attribuées à un fluide particulier.. 388
177. Sous l'influence de l'aimant, le fer devient lui-même un aimant.. 389
178. Les fluides magnétiques ne passent pas de l'aimant au fer, et n'éprouvent pas un déplacement sensible dans l'intérieur des corps.. 391
179. L'acier prend toutes les propriétés magnétiques des aimants...... 392
180. Des diverses substances magnétiques et de leur force coercitive... 394
181. Moyen de reconnaître si une substance est simplement magnétique ou si elle est aimantée................................ 395

CHAPITRE II.

Action magnétique de la terre.

182. Direction des aimants, méridien magnétique, déclinaison, inclinaison.. 397
183. La force magnétique de la terre peut être représentée par un couple. 401
184. Boussole de déclinaison.................................... 403
185. Boussole d'inclinaison..................................... 407
186. Boussole des variations diurnes............................ 409
187. Perturbation de l'aiguille aimantée........................ 412
188. Intensité magnétique de la terre........................... 414
189. Action magnétique de la terre sur le fer doux.............. 418
190. Causes diverses qui font varier les forces coercitives...... 419
191. Compensateur destiné à corriger l'action de la terre sur le fer des vaisseaux.. 421
192. Influence de l'action de la terre sur la marche des chronomètres.. 425

CHAPITRE III.

Lois générales du magnétisme.

Numéros. Pages.

193. Comparaison des forces magnétiques 427
194. Méthode des oscillations 427
195. Balance de torsion 429
196. Loi des attractions et des répulsions magnétiques 432
197. Distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés 434
198. Idée générale de la théorie du magnétisme 436

CHAPITRE IV.

Procédés d'aimantation.

199. Procédé de Duhamel ou de la touche séparée 439
200. Procédé d'OEpinus ou de la double touche 439
201. Du point de saturation 440
202. Influence de la trempe sur la force coercitive 442
203. Influence de la chaleur sur le magnétisme 444
204. Causes qui déterminent l'aimantation 446
205. Des aimants naturels et artificiels 446

DEUXIÈME SECTION.

Électricité.

CHAPITRE I.

Des actions électriques.

206. Substances qui prennent par le frottement la propriété d'attirer les corps légers. — Électroscopes 450
207. Corps conducteurs et non conducteurs 451
208. Les phénomènes électriques se produisent comme s'il y avait deux espèces d'électricité 454
209. Des fluides électriques et de l'état naturel des corps 455
210. De la communication de l'électricité 457

CHAPITRE II.

Électricité par influence.

211. Un corps électrisé décompose à distance les électricités naturelles de tous les corps conducteurs 460
212. Les corps électrisés par influence retombent à l'état naturel dès que l'influence cesse 462
213. Phénomène que présente un corps électrisé par influence et communiquant au sol 464

Numéros. Pages.

214. Construction et usage des divers électroscopes........ 465
215. Électrophore........ 467
216. Machines électriques........ 467
217. Expériences diverses au moyen des machines électriques........ 469
218. Machine hydro-électrique de M. Armstrong........ 470

CHAPITRE III.

Des forces électriques.

219. Les attractions et répulsions électriques sont en raison composée des quantités de fluides, et en raison inverse du carré de la distance........ 473
220. Perte de l'électricité par l'air et par les supports........ 474
221. Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs.... 477

CHAPITRE IV.

Électricité dissimulée.

222. De la dissimulation de l'électricité et de sa recomposition lente et de sa recomposition subite........ 485
223. Condensateurs........ 487
224. Bouteille de Leyde et batteries électriques........ 490
225. Expériences de M. Knochenhauer........ 498

CHAPITRE V.

Lumière électrique et mouvement des corps électrisés.

226. Conditions générales sous lesquelles l'électricité produit de la lumière........ 501
227. Lumière électrique dans les gaz sous la pression atmosphérique.. 501
228. Lumière électrique dans les gaz raréfiés........ 504
229. Diverses causes auxquelles on attribue la lumière électrique...... 505
230. Mouvements des corps non conducteurs électrisés........ 506
231. Mouvement des corps conducteurs électrisés........ 507
232. Mouvements produits par l'écoulement de l'électricité........ 508
233. Mouvements produits par les décompositions instantanées....... 509

CHAPITRE VI.

Électricité développée par la pression et par la chaleur.

234. Le frottement n'est pas la seule cause du développement de l'électricité........ 510
235. Développement de l'électricité par la pression........ 510
236. Développement de l'électricité par la chaleur........ 511

TROISIÈME SECTION.

Électro-magnétisme.

CHAPITRE I.

Galvanisme et pile de Volta.

237. Découverte du galvanisme........ 514
238. Expériences de Volta. — Force électro-motrice. — Construction et caractères de la pile.................................... 518
239. Effets de la pile. — Effets physiologiques. — Effets physiques. — Effets chimiques.................................... 521
240. Diverses dispositions de la pile. — Pile à auges. — Pile de Wollaston. Pile en hélice.................................... 525
241. Piles sèches, ou piles de Zamboni. — Électroscope de Bohnenberger. — Piles de Delezenne............................ 529

CHAPITRE II.

De l'action des courants sur les aimants.

242. Découverte de l'électro-magnétisme........................ 532
243. Le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui, le pôle austral à gauche.. 534
244. Rotation des aimants par l'influence des courants.............. 536
245. L'intensité de l'action du courant est en raison inverse de la simple distance.. 537
246. Conditions d'équilibre d'une aiguille aimantée soumise à l'action d'un courant rectiligne indéfini.......................... 539
247. Multiplicateur ou galvanomètre.............................. 540
248. Aimantation par le courant de la pile et par l'électricité ordinaire. 542
248 *bis*. Surfaces polaires des électro-aimants et champs magnétiques... 546

CHAPITRE III.

Action de la terre et des aimants sur les courants.

249. Direction des courants par l'influence du magnétisme de la terre. 551
250. Direction des courants verticaux par l'influence de la terre.... . 554
251. Rotation des courants horizontaux par l'influence de la terre..... 555
252. Direction des courants par les aimants........................ 556
253. Rotation des courants par les aimants........................ 557
254. De quelques phénomènes que présentent les courants qui passent dans les liquides.. 559

CHAPITRE IV.

De l'action des courants sur les courants.

255. Découverte d'Ampère.. 561

Numéros. Pages.

256. Action des courants parallèles. 561
257. Action des courants sinueux. 562
258. Action des courants croisés. 563
259. Rotation d'un courant par l'action d'un courant. 564

Théorie du magnétisme.

260. Théorie du magnétisme, en attribuant ses effets à des courants moléculaires. 566
261. Direction du courant terrestre. 567
262. Position du courant terrestre. 568

Action de la terre sur les courants.

263. Direction des courants fermés. 569

Action de la terre sur les aimants.

264. Déclinaison. 569
Inclinaison. 569
Variations diurnes et perturbations. 569

Action mutuelle des aimants et des courants.

265. Direction des aimants par les courants. 570
Rotation des aimants par les courants. 570
Rotation des courants par les aimants. 571

Action des aimants les uns sur les autres.

266. Attraction et répulsion des aimants. 575
Aimantation. 575

CHAPITRE V.

Causes diverses qui donnent naissance à des courants électriques.

Considérations générales sur l'origine des courants. 576

Actions mécaniques.

267. Frottement, pression, clivage. 578

Actions physiques.

Actions capillaires, chaleur, magnétisme, électricité. 582
268. Actions capillaires. 583
269. Action de la chaleur, phénomènes thermo-électriques. 583
270. Phénomènes d'induction. 587

Actions chimiques.

271. Combustion, action des acides sur les métaux ou sur leurs bases, réaction des dissolutions les unes sur les autres, et décompositions chimiques. 592

Actions physiologiques et poissons électriques.

Poissons électriques. 597

Numéros. Pages.
272. Propriétés de la torpille........c.............................. 598
Propriétés du gymnote.. 599
De l'organe électrique.. 602

CHAPITRE VI.

Lois générales d'intensité des courants électriques.

Division générale des courants adoptée pour cette étude......... 604

Courants thermo-électriques.

273. L'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit qu'il traverse.. 604
274. L'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section..................... 605
275. Conductibilité des différents métaux.......................... 606
276. Intensité du courant dans un circuit simple et homogène......... 609
277. Intensité du courant dans un circuit simple et hétérogène......... 610
278. Courants complexes ou dérivés................................ 611
279. Théorie du multiplicateur appliquée au courant thermo-électrique. 620
280. Mesures des hautes températures.............................. 621
281. Intensité magnétique de la terre.............................. 623
282. Diverses sources thermo-électriques........................... 625
283. Piles thermo-électriques..................................... 625

Courants hydro-électriques.

284. Boussole de sinus, et boussole de tangentes.................... 627
285. Lois de l'intensité du courant produit par un élément.......... 629
286. Courants dérivés... 632
287. Lois de l'intensité des courants produits par une pile.......... 633
288. Loi de l'intensité d'un courant produit par plusieurs éléments réunis pôle à pôle.. 639

Comparaison des différentes sources électriques.

289. Rapport de conductibilité des liquides et des métaux........... 641
290. Rapport d'intensité des courants thermo-électriques et hydro-électriques... 644
291. Définitions de l'intensité des courants, de la quantité d'électricité qui les constitue, et de la tension des sources électriques....... 645
292. Source électrique prise pour unité de tension.................. 649
293. Quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau. 650

CHAPITRE VII.

Électro-chimie.

§ 1. *Décompositions chimiques produites par les courants électriques.*

294. Définitions et décomposition de l'eau.......................... 654
295. Loi de M. Faraday sur les équivalents électro-chimiques......... 658
Eau acidulée et alcaline... 658

Numéros. Pages.

Dissolutions salines. 658
Métalloïdes oxygénés et métaux oxygénés. 660
Chlorures, bromures, iodures, etc. 661
Cyanures. 662
Conclusion. 663
296. Loi d'inégalité dans la puissance chimique des pôles. 663
297. Pôles multiples. 665
298. Décomposition des alcalis. 666
299. Dissolutions alcooliques. 667
300. Passivité du fer. 667
301. Polarisation électrique. 669
302. Action du courant sur plusieurs dissolutions. 670
303. Décomposition par l'électricité des machines. 673

§ 2. *Actions lentes produites par l'électricité.*

304. Arbre de Saturne. 674
305. Conservation du doublage des vaisseaux. 675
306. Corps simples, oxydes, etc., obtenus par M. Becquerel. . . . 675

§ 3. *Descriptions des piles voltaïques de divers systèmes, et examen des actions chimiques qu'elles éprouvent.*

307. Piles à un seul liquide. — Éléments de Smée, de Wollaston, de Young, de Munch, de Sturgeon, de Wheatstone, de Bagration. 678
308. Piles à deux liquides. — Éléments de Daniell, de Becquerel, de Bunsen, de Schœnbein, de Grove avec tête de pipe, de Grove avec zinc amalgamé, de de La Rive avec oxyde de plomb. 686
309. Pile à gaz de Grove. 692
310. Pile de Pulvermacher. 694

§ 4. *Affinités chimiques modifiées par la lumière et par l'électricité.*

311. La lumière excite un courant électrique dans les substances photographiques. 694
312. L'électricité modifie les affinités chimiques, ozone. 697

§ 5. *Diverses applications de l'électricité voltaïque.*

313. Définitions. 703
314. Galvanoplastique. 704
315. Électrotypie. 709
316. Dépôt des métaux en couches minces, dorure, argenture, etc. . . . 710
317. Dépôt des oxydes et coloration des métaux par l'oxyde de plomb. 712

CHAPITRE VIII.

Phénomènes d'induction.

318. Appareil d'induction produisant tous les effets de la pile. . . . 718
319. Phénomènes magnétiques des corps conducteurs. 720
320. Courants d'induction de divers ordres. 724
321. Intensités différentes que présente le même courant. 727

Numéros. Pages.
322. Influence des plaques interposées.......... 728
323. Réaction que les courants d'induction exercent les uns sur les autres. 728
324. Courants d'induction produits par l'électricité ordinaire........ 730
325. Induction produite par le mouvement des métaux magnétiques ou non magnétiques.......... 731
326. Condensateur électro-chimique de M. de La Rive.......... 733
327. Lumière électrique produite par induction. — Appareil de Ruhmkorff.......... 734
328. Rotation d'une masse de cuivre subitement arrêtée par le développement des courants induits. — Expériences de M. Matteucci. — Expériences de M. Foucault.......... 737
329. Détonation produite par la rupture du circuit.......... 740
330. Machines électro-magnétiques.......... 741
330 *bis*. Appareil électro-physiologique de M. Boeck.......... 744

CHAPITRE IX.

Diamagnétisme et magnétisme de tous les corps.

331. Substances diamagnétiques.......... 749
332. Propriétés des substances diamagnétiques.......... 752
333. Action des aimants sur les liquides magnétiques.......... 752
334. Action des aimants sur la flamme.......... 753
335. Magnétisme de l'oxygène.......... 754
336. Comparaison des mouvements magnétiques et diamagnétiques. Tableau de M. Faraday.......... 758
337. Actions magnétiques dépendantes de la structure des corps.......... 761
338. Hypothèses.......... 762

CHAPITRE X.

Télégraphie électrique. — Horloges électriques. — Vitesse de l'électricité. — Vitesse des projectiles dans les armes à feu.

§ 1. *Télégraphes électriques.*

339. Production du mouvement alternatif à de grandes distances.......... 766
340. Télégraphes à cadran — ordinaire, — de Breguet, — de Froment, de Siemens.......... 771
341. Télégraphes à signaux conventionnels — de Breguet. — anglais.. 789
342. Télégraphes écrivants — de Froment, — de Morse, — de Dujardin, — de Bain.......... 796
343. Établissement des circuits — aériens, — souterrains, — sous-marins.......... 803
344. Effets de la foudre et de l'électricité atmosphérique.......... 808
344 *bis*. Transmission simultanée par le même fil et dans les deux sens opposés.......... 809

§ 2. *Horloges électriques.*

345. Une seule horloge peut, au moyen du courant, faire mouvoir les aiguilles de plusieurs cadrans très-éloignés.......... 813
345 *bis*. Horloge électro-magnétique de M. Froment.......... 815

§ 3. *Vitesse de l'électricité.*

346. Expériences diverses.. 817

§ 4. *Vitesse des projectiles dans les armes à feu.*

347. Expériences de M. Pouillet.................................. 818

Première addition au Tome premier.

Froid produit par le passage des courants.......................... 823

Deuxième addition au Tome premier.

Note sur le mouvement du pendule simple en ayant égard à la rotation diverse de la terre.................................. 825
Table des équivalents chimiques.................................. 829

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

Ch. Lahure, imprimeur du Sénat et de la Cour de Cassation
(ancienne maison Crapelet), rue de Vaugirard, 9.